

Научная статья

УДК 669:213

doi: 10.17223/24135542/37/6

Биовыщелачивание золота из отходов горнодобывающей промышленности

**Виктор Иванович Сачков¹, Инна Владимировна Луцаева²,
Елена Борисовна Дайбова³, Родион Олегович Медведев⁴,
Максим Владимирович Сусид⁵**

^{1, 2, 4, 5} *Томский государственный университет, Томск, Россия*

³ *Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа –
филиал СФНЦА РАН, Томск, Россия*

¹ *vicsachkov@gmail.com*

² *luschaeva@mail.ru*

³ *edaibova@yandex.ru*

⁴ *mail@rodionmedvedev.ru*

⁵ *mattakushi86@mail.ru*

Аннотация. Освещается актуальная тема биовыщелачивания золота из углисто-глинистых сланцев и пиритовых техногенных отходов, что представляет собой экологически безопасный и экономически выгодный метод извлечения ценных металлов. Исследование подчеркивает важность инновационных подходов в условиях сокращения природных ресурсов и необходимости снижения негативного воздействия на окружающую среду.

Детально описываются процесс подготовки образцов, методы анализа минерального и химического состава, а также лабораторные методы определения концентрации золота. Результаты исследований показывают, что образцы содержат достаточное количество золота для классификации как золотосодержащие руды, что делает их подходящими для биовыщелачивания.

Основное внимание уделено изучению биовыщелачивания с использованием естественных микробиомов и накопительных культур бактерий. Анализируются эффективность различных питательных сред, способствующих росту бактерий, и их влияние на степень извлечения золота. Эксперименты демонстрируют, что биовыщелачивание значительно увеличивает степень извлечения золота по сравнению с традиционными методами, при этом минимизируя экологические риски.

Также рассматриваются различные аспекты биовыщелачивания, включая специфику применяемых биологических агентов, оптимальные уровни pH и концентрации токсичных металлов. Показано, что эти параметры оказывают прямое влияние на производительность процесса и требуют дальнейших исследований для оптимизации условий.

Заключительная часть статьи посвящена анализу результатов биовыщелачивания, по результатам которого можно сделать вывод о высокой перспективности метода для извлечения золота из упорных руд и техногенных отходов. Подчеркивается, что биовыщелачивание может стать ключевым направлением в металлургии, способствующим устойчивому развитию и экологической безопасности производственных процессов.

Статья вносит значительный вклад в разработку и оптимизацию экологически безопасных методов добычи золота, предлагая решения, которые могут быть использованы для повышения эффективности переработки золотосодержащих руд и снижения воздействия на окружающую среду. Авторы подчеркивают необходимость продолжения исследований в данной области для достижения максимальной эффективности и экономической выгоды от использования биовыщелачивания.

Статья подготовлена по итогам участия в VI Международном симпозиуме «Фундаментальные вопросы геологии, добычи, разделения редких, редкоземельных, благородных металлов и создания современных материалов на их основе», 19–22 августа 2024 г., Якутск, Республика Саха (Якутия).

Ключевые слова: биовыщелачивание, извлечение золота, биотехнология, углисто-глинистые сланцы, пиритовое техногенное сырьё

Для цитирования: Сачков В.И., Лушаева И.В., Дайбова Е.Б., Медведев Р.О., Сусид М.В. Биовыщелачивание золота из отходов горнодобывающей промышленности // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2025. № 37. С. 84–99. doi: 10.17223/24135542/37/6

Original article

doi: 10.17223/24135542/37/6

Bioleaching of gold from mining waste

**Viktor I. Sachkov¹, Inna V. Lushchaeva², Elena B. Daibova³,
Rodion O. Medvedev⁴, Maksim V. Susid⁵**

^{1, 2, 4, 5} Tomsk State University, Tomsk, Russia

*³ Siberian Research Institute of Agriculture and Peat – branch of the Siberian Federal
Scientific Center of Agro-Bio Technologies of the Russian Academy of Sciences,
Tomsk, Russia*

¹ vicsachkov@gmail.com

² lushchaeva@mail.ru

³ edaibova@yandex.ru

⁴ mail@rodionmedvedev.ru

⁵ mattakushi86@mail.ru

Abstract. The article highlights the current topic of bio-leaching of gold from carbonaceous clay shales and pyrite man-made waste, which is an environmentally safe and economically profitable method of extracting valuable metals. The study highlights the importance of innovative approaches in the context of reducing natural resources and the need to reduce the negative impact on the environment.

The process of sample preparation, methods of analysis of mineral and chemical composition, as well as laboratory methods for determining the concentration of gold are described in detail. The research results show that the samples contain sufficient gold to be classified as gold-bearing ores, which makes them suitable for bioleaching.

The main attention is paid to the study of bio-leaching using natural microbiomes and bacterial storage cultures. The authors analyze the effectiveness of various nutrient media that promote bacterial growth and their effect on the degree of gold extraction. Experiments demonstrate that bio-leaching significantly increases the degree of gold recovery compared to traditional methods, while minimizing environmental risks.

The article also discusses various aspects of bio-leaching, including the specifics of the biological agents used, optimal pH levels and concentrations of toxic metals. It is shown that these parameters have a direct effect on the productivity of the process and require further research to optimize the conditions.

The final part of the article is devoted to the analysis of the results of bio-leaching, based on the results of which it can be concluded that the method is highly promising for extracting gold from stubborn ores and man-made waste. It is emphasized that bio-refining can become a key direction in metallurgy, contributing to the sustainable development and environmental safety of production processes.

The article makes a significant contribution to the development and optimization of environmentally safe methods of gold mining, offering solutions that can be used to improve the efficiency of processing gold-bearing ores and reduce environmental impact. The authors emphasize the need to continue research in this area in order to achieve maximum efficiency and economic benefits from the use of bio-leaching.

The article was prepared on the base of materials for VIth International Symposium «Fundamental Aspects of Rare-Earth and Precious Metals of Geology Exploration, Mining, Separation and Modern Materials Engineering». August 19–22, 2024, Yakutsk, Sakha Republic (Yakutia).

Keywords: bioleaching, gold extraction, biotechnology, carbonaceous shales, pyrite technogenic raw materials

For citation: Sachkov, V.I., Lushchaeva, I.V., Daibova, E.B., Medvedev, R.O., Susid, M.V. Bioleaching of gold from mining waste. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Chimia – Tomsk State University Journal of Chemistry*, 2025, 37, 84–99. doi: 10.17223/24135542/37/6

Введение

В контексте устойчивого развития акцентируется внимание на критической проблематике деградации природных ресурсов. Из-за интенсивной эксплуатации запасы полиметаллических руд и цветных металлов, которые служат фундаментом для создания ключевых материалов и изделий, неуклонно сокращаются. Это обстоятельство вынуждает представителей горнодобывающей и металлургической отраслей искать альтернативные источники сырья.

Вместе с тем в процессе добычи и переработки полезных ископаемых образуется большое количество отходов, которые накапливаются в отвалах. Эти отходы представляют собой серьезную экологическую проблему, так как часто содержат токсичные вещества, которые загрязняют почву, воду и воздух. К настоящему времени количество неутилизованных отходов в Российской Федерации оценивается приблизительно в 8,4 млрд т, причем большую часть составляют остатки добычи горной отрасли. Показано, что в отходах содержится значительное количество золота, которое может быть извлечено и использовано в промышленности [1, 2].

С точки зрения промышленной экологии необходимо отметить, что, хотя традиционные методы пирометаллургии, применяемые для обработки сульфидных и углисто-глинистых руд, демонстрируют высокую производительность, они также несут в себе значительные экологические риски. Это

обусловлено выделением в ходе переработки токсичных веществ, которые имеют потенциал нанесения ущерба как природной среде, так и здоровью человека [3].

В частности, при переработке подобных руд образуются выбросы в атмосферу токсичной пыли и сернистого газа. Токсичная пыль содержит тяжелые металлы и другие вредные вещества, которые могут накапливаться в почве, воде и воздухе. Сернистый газ является одним из основных компонентов кислотных дождей, которые наносят ущерб лесам, водоемам и другим природным объектам [4].

В рамках устойчивого развития промышленных технологий актуализируется необходимость создания новаторских, экологически безопасных и экономически выгодных методик экстракции ценных элементов из техногенных отходов. Это не только способствует интеграции новых типов сырья в производственный цикл, но и ведет к значительному снижению экологического воздействия на окружающую среду.

В сфере металлургии биовыщелачивание выступает как инновационный и экологически безопасный подход к переработке золотосодержащих руд. Этот метод открывает возможности для обработки рудных запасов, которые прежде считались экономически нецелесообразными для традиционных технологий извлечения. За последние десятилетия был достигнут значительный прогресс в разработке и оптимизации биотехнологических процессов, что позволило расширить спектр извлекаемых металлов, включая кобальт (Co), никель (Ni), медь (Cu), цинк (Zn) [5, 6] и золото (Au) [7, 8].

Тем не менее, несмотря на очевидные преимущества, реализация биовыщелачивания требует тщательного анализа множества переменных. К ним относятся специфика применяемых биологических агентов, идеальный уровень pH и концентрация токсичных металлов в среде. Эти критические параметры оказывают прямое влияние на производительность биовыщелачивания и подчеркивают необходимость глубоких научных исследований для выявления наиболее оптимальных условий для данного процесса [9].

Таким образом, хотя биовыщелачивание представляется многообещающим подходом к переработке упорного бедного сырья, для его широкого применения необходимы дальнейшие исследования, направленные на разработку эффективных методик и оптимизацию параметров процесса. Всестороннее изучение влияния параметров процесса биовыщелачивания золота из упорных сульфидсодержащего сырья и углисто-глинистых сланцев представляет собой актуальное направление исследований в области биотехнологии и металлургии. Этот подход приобретает особую значимость в контексте растущего интереса к устойчивому развитию и экологической безопасности производственных процессов.

Материалы

В качестве прототипов золотосодержащих рефрактерных руд были выбраны углисто-глинистые сланцы, локализованные в пределах Кировско-

Крыклинской рудоносной зоны Уральского федерального округа (Оренбургская область). Данные образцы характеризуются как плотные глинистые породы темно-серого или черного оттенка с листоватой структурой, обладающие способностью к дроблению на тонкие пластины.

В контексте техногенных отходов объектом изучения стали пиритовые хвосты, являющиеся результатом флотационного обогащения сульфидных медно-цинковых руд, произведенных в Свердловской области Уральского федерального округа. Эти отходы представлены в виде агломератов сферической формы светло-коричневого цвета с размерами частиц, достигающими 10 мм.

Для подготовки к лабораторным испытаниям образцы подверглись измельчению до фракций размером в 1 мм с использованием вибрационной конусной мельницы-дробилки модели ВКМД-10 производства Российской Федерации.

Методы

Минералогический состав в пробах углисто-глинистого сланца с размером частиц руд 1 мм определяли методом рентгеноструктурного анализа с использованием порошкового дифрактометра D2 PHASER. Морфологию образцов исследовали с помощью электронного микроскопа Hitachi S-3400N. Микроскоп оснащен энерго-дисперсионной приставкой X Flash 4010, которую использовали для определения элементного состава руд с использованием энергодисперсионного метода.

Для пиритовых отходов элементный состав и морфологию исходного сырья определяли методом энергодисперсионного рентгеновского анализа на микроскопе Tescan Vega 3 SBH, а фазовый состав образцов исследовали на дифрактометре XRD-6000 с использованием излучения CuK_α .

Концентрации золота в составе проб (г/т) до и после выщелачивания определяли с помощью масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на масс-спектрометре ICP-MS ELAN-9000 DRC-e (Perkin Elmer, США). Согласно методике, брали 10 г раствора образца, предварительно подвергнутого мокрому озолению при 450°C, и распыляли полученный раствор в плазме индуктивно связанного разряда. Калибровочная кривая Au строилась в диапазоне 0,0000001...0,0035 мас. %. Полученную концентрацию использовали для расчета степени биовыщелачивания как разницы между исходной и конечной концентрациями золота в руде (%).

Для извлечения золота из руды применялся метод биовыщелачивания с использованием фракций размером $(1,0 \pm 0,01)$ мм. В настоящей работе применялся метод, основанный на стимулировании естественного микробиома углисто-глинистых сланцев и пиритового сырья. Кроме того, был протестирован метод, который опирается на использование накопительных культур, полученных на разных питательных средах из углисто-глинистых сланцев.

Для исследования руды использовали три вида питательных сред:

- пептонную воду (PM), которая представляла собой водопроводную воду с добавлением бактопептона в концентрации $(2,50 \pm 0,1)$ г/л производства Difco, США;

- среду PW30, приготовленную на основе раствора Виноградского (50 мл/л) с добавлением K_2HPO_4 , $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, NaCl, $Fe_2(SO_4)_3$, $MnSO_4$, водопроводной воды и бактопептона производства Difco, США, а также дистиллированной воды в соотношении 1 000 и 950 мл соответственно;

- среду Летена (LM), содержащую $(NH_4)_2SO_4$, KCl, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, KH_2PO_4 , $Ca(NO_3)_2$ и 10%-ный раствор $FeSO_4$.

Все среды были подготовлены и стерилизованы перед использованием. Руду выдерживали в этих средах в стеклянных колбах объемом 250 мл (100 мл среды, содержащей 10% частиц руды) при температуре $(25 \pm 0,5)^\circ C$ без перемешивания в течение 50 сут. После этого пробы центрифугировали при 2 500 об./мин в течение 10 мин на центрифуге Eppendorf AG 22331 Hamburg (Germany), объем пробирки составлял 50 мл. Осадок высушивали в воздушном термостате Sanyo MIR-154 (Япония) при температуре $(45 \pm 0,5)^\circ C$ в течение 24 ч, после чего определяли элементный состав породы.

Во втором методе сначала получали накопительные культуры (консорциумы бактерий), помещая сланцы в питательные среды следующего состава:

- пептонная вода (PM);

- среда PW30 для бактерий, выщелачивающих золото.

Накопительные культуры выращивали в термостате при температуре $(25 \pm 0,5)^\circ C$ без перемешивания в течение 30 сут, pH 4,5. Накопительную культуру, полученную на PM, обозначили как G1, а на среде PW30 – как G2. Полученные накопительные культуры выращивали и хранили на соответствующих средах.

Исследование биовыщелачивания золота под воздействием накопительных культур G1 и G2 проводили в стеклянных колбах объемом 500 мл с 200 мл питательной среды PW30 и содержанием измельченной руды 10% (объем к объему). Каждую колбу засеяли клеточной суспензией соответствующей накопительной культуры (G1 или G2) в количестве 5% (объем к объему). Колбы инкубировали при $(25 \pm 0,5)^\circ C$ без перемешивания в течение 28 сут.

Для изучения элементного состава породы и технологического раствора пробы центрифугировали при 2 500 об./мин в течение 10 мин на центрифуге Eppendorf AG 22331 Hamburg (Германия), объем пробирки – 50 мл. Осадок высушивали в воздушном термостате Sanyo MIR-154 (Япония) при $(45 \pm 0,5)^\circ C$ в течение 24 ч.

Результаты

Согласно данным рентгеноструктурного анализа (табл. 1), в составе пробы углисто-глинистых сланцев преобладают глинистые минералы типа иллит (58%), в разной степени гидратированный мусковит (17%), а также

кварц (11%), клинохлор 1М₁ (хлорит). В следовых количествах присутствует цеолит. В целом породу можно диагностировать как кварц-гидросерицит-каолинит-иллитовый аргиллит или как кварц-гидросерицит-глинистый сланец.

Таблица 1

Породообразующие минералы в пробе углисто-глинистых сланцев

Минералы	Содержание фаз, мас. %
Иллит 2М ₁	46
Мусковит 2М ₁ (серицит)	12
Кварц	11
Иллит 2М ₂	12
Каолинит 1А	8
Мусковит 1М (гидросерицит)	5
Цеолит	6%

На рис. 1 представлена дифрактограмма, полученная при рентгенофазовом анализе исходных образцов пиритового сырья.

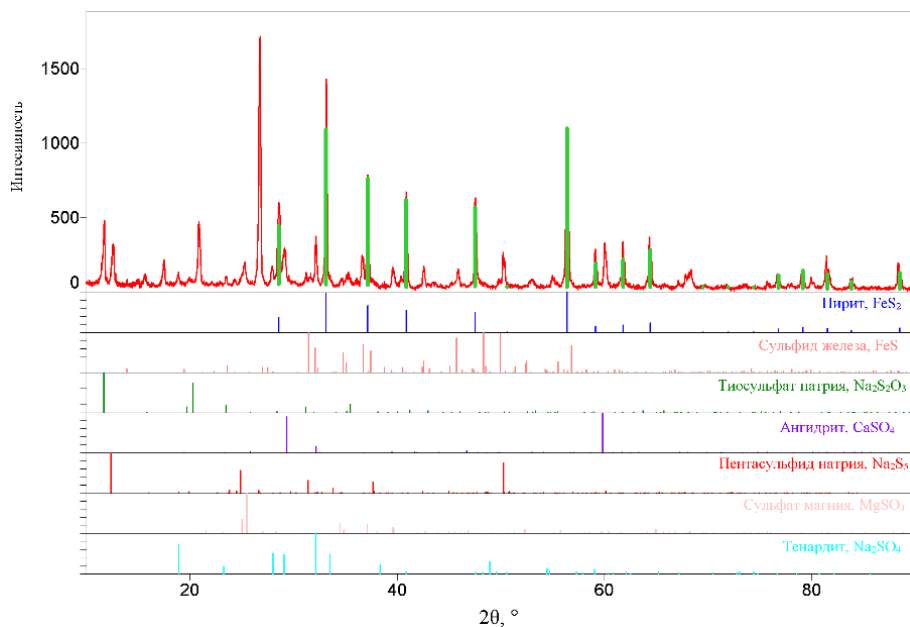


Рис.1. Дифрактограмма исходного пиритового сырья

По результатам рентгенофазового анализа и данных о химическом составе образца пиритовых техногенных отходов в сырье определены фазы: пирит (FeS_2), сульфид железа (FeS), тиосульфат натрия ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$), ангидрит (CaSO_4), пентасульфид натрия (Na_2S_5), сульфат магния (MgSO_4), тенардит (Na_2SO_4).

В итоге в сырье преобладает сульфид железа (FeS_2). Арсенипирит может изоморфно входить в структуру орторомбического FeS_2 . Содержание этой

фазы ниже погрешности рентгенофазового анализа (РФА), поэтому о ее наличии можно судить по присутствию мышьяка в элементном анализе. Хвосты представляют собой частично окисленное сульфидное сырье.

Анализ минерального состава углисто-глинистых сланцев с помощью электронного микроскопа Hitachi S-3400N позволил выявить наличие 12 микроминеральных фаз размером до 1 мкм. Список обнаруженных микроминеральных фаз представлен в табл. 2. Общий вид углисто-глинистых сланцев показан на рис. 2, 3.

Таблица 2

**Микроминеральные фазы и их элементный состав
в пробе углисто-глинистых сланцев**

Минерал	Элемент	Содержание, %	Минерал	Элемент	Содержание, %
Пирит	Fe	41,2	Оловосодержащая фаза (кассетерит)	Sn	47,1
	S	51,7		S	0,3
Марказит	Fe	47,8	Свинецсодержащая фаза (глёт)	Pb	44,0
	S	46,0		S	3,4
Арсенид железа (лёлингит)	As	28,9	Халькопирит	Cu	29,2
	Fe	30,0		Fe	25,4
	S	0,6		S	26,2
Вольфрамсодержащая фаза (вольфрамит)	W	59,8	Циркон	Zr	37,5
	Ti	3,2		Si	7,3
	Fe	1,7		O	53,8
Золото самородное медьсодержащее	Au	49,6	Барит	Ba	44,8
	Cu	1,7		S	10,5
				Ca	1,2
Индий содержащая фаза (гидроксид индия с хлором)	In	44,2	Монацит	P	12,3
	Cl	4,0		La	10,8
	Fe	0,4		Ce	20,4
				Nd	9,6
	S	0,2		Sm	0,3
		Th		3,9	

Исследование показало, что золото в образце находится в свободном самородном состоянии (см. рис. 2). Оно ассоциировано с пиритом, марказитом и арсенидом железа типа лёллингита, но не арсенопирита, что может указывать на отсутствие связанного Au в сульфидах.

Кроме того, были обнаружены халькопирит (см. рис. 3) и редкая форма оксида свинца типа глёт, что, возможно, свидетельствует о развитии зоны окисления.

Распределение элементов в пиритовом сырье было изучено на электронном микроскопе. Результаты распределения элементов на типичном зерне пирита представлены на рис. 4.

В ходе исследования было установлено, что основные элементы распределяются по зерну равномерно. При изучении поверхностей зёрен пирита и сульфидных агрегатов обособленных самородных частиц золота обнаружено

не было. Предположительно, это объясняется тем, что золото тонко вкраплено в матрицу пирита вследствие необменного поглощения (фиксации) дефектами структуры или присутствует в виде микропримесей в теле минерала.

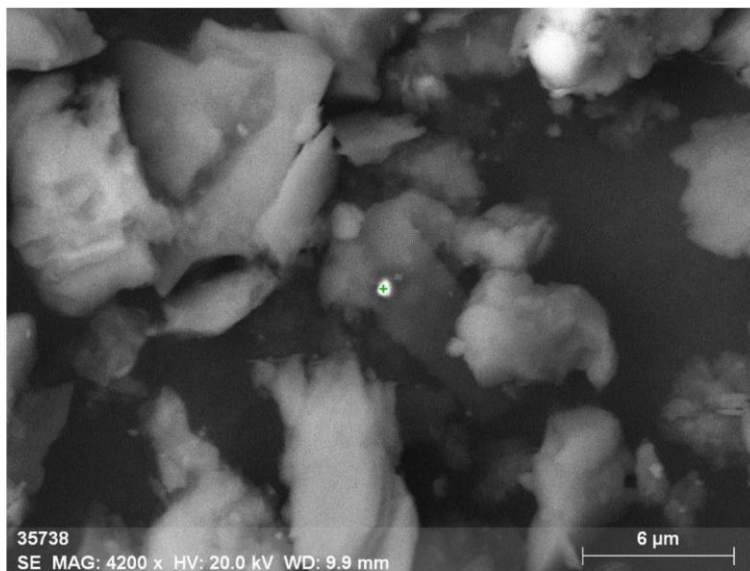


Рис.2. Микрофотография углисто-глинистых сланцев, отмечена фаза золота, содержащая медь



Рис.3. Микрофотография углисто-глинистых сланцев, отмечена фаза сульфида меди и железа (халькопирит)

Углисто-глинистые сланцы представляют собой алюмосиликатную породу с высоким содержанием калия (3,2%), железа (3,1%), натрия и серы (1,2%) (табл. 3). Из-за особенностей используемого аналитического метода углерод не удалось определить точно, но его доля составляет не более 7%. Высокое содержание серы и железа в породе позволяет предположить наличие сульфидов железа на уровне 0,1–0,2%.

Пиритовые отходы в большей степени представлена сульфидом железа с повышенным содержанием кремния (8,6%), магния (4,2%), кальция (2,9%) и алюминия (2,6%) (табл. 3).

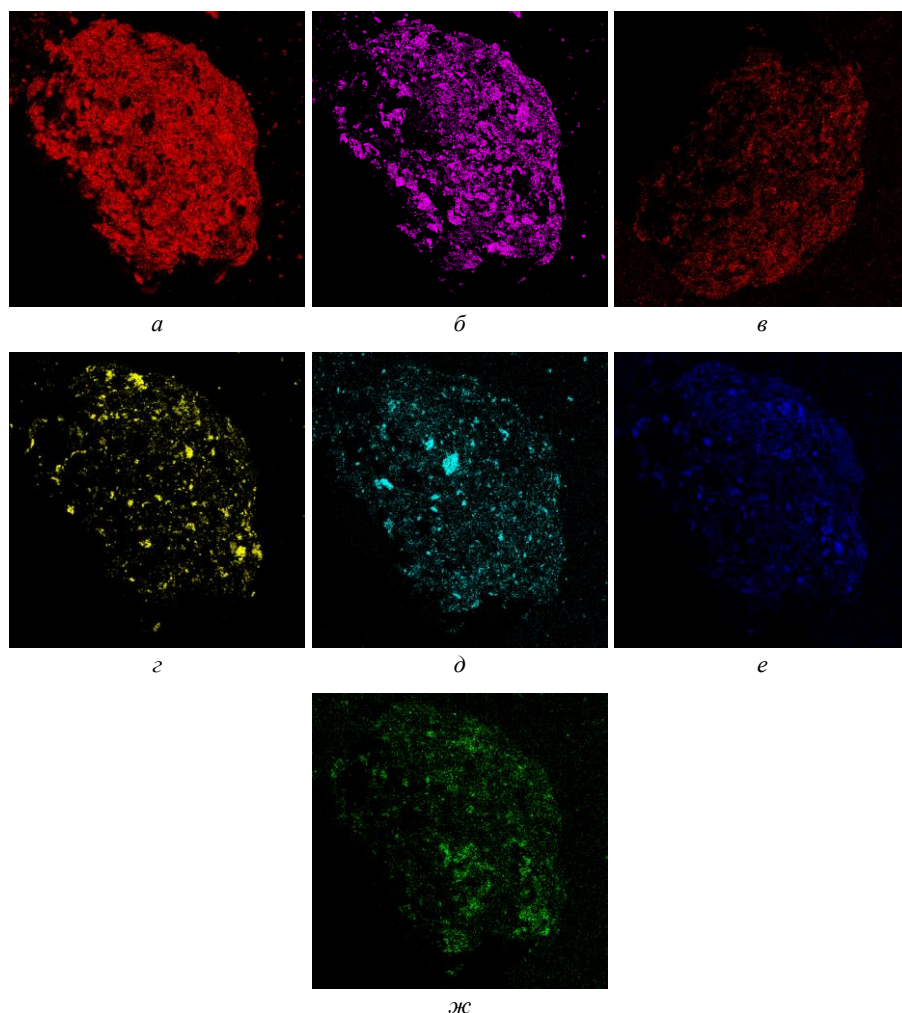


Рис. 4. Распределение элементов на поверхности зерна:
а – железо; б – сера; в – кислород; г – кремний;
д – кальций; е – алюминий; ж – магний

Таблица 3

**Химический состав углисто-глинистых сланцев и пиритового сырья
по результатам EDS**

Элемент	Содержание, мас. %	
	Углисто-глинистые сланцы	Пиритовые отходы
Si	20,4	8,6
Al	13,4	2,6
K	3,2	–
Fe	3,1	36,9
Na	1,3	–
S	1,2	24,1
Ca	0,3	2,9
O	57,0	20,6
Mg	–	4,2
C	< 7,0	–

Таблица 4

**Химический состав углисто-глинистых сланцев и пиритового сырья
по результатам ISP-MS**

Элемент	ICP-MS	
	Содержание, г/г	
	Углисто-глинистые сланцы	Пиритовые отходы
Au	2,17	1,15
Ag	0,5	13,6
Cu	160	1200
Zn	31,7	1500
As	948	1400
Sb	58,9	57
Pb	5,08	380
In	5,76	2
Ge	4,85	1,5

Применение метода ISP-MS позволило выявить определенные геохимические характеристики исследуемых сланцев и пиритовых отходов, которые выражаются в повышенном содержании таких элементов, как мышьяк, медь, сурьма, никель и цинк. Установлено, что 1 тонна сланцев включает до 2,2 г золота, а пирита – до 1,15 г (табл. 4). Поэтому исследуемые образцы можно классифицировать как убогие золотосодержащие руды.

Биовыщелачивающие бактерии

Анализ ДНК показал, что в консорциуме G1 преобладают представители рода *Pseudomonas*, составляющие 68% от общего числа микроорганизмов (рис. 5). Также в нем присутствуют бактерии *Bacillus* (17%) и *Stenotrophomonas* (14%). Доля представителей *Acidiplasma* незначительна и составляет всего 0,01%.

Pseudomonas способны дезактивировать углеродистые компоненты, что может способствовать увеличению выхода золота [10, 11].

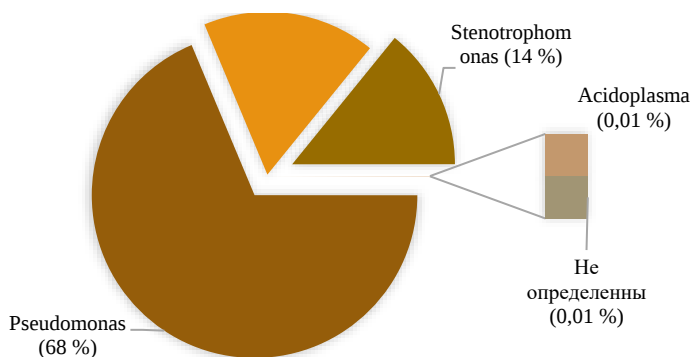


Рис. 5. Состав накопительной бактериальной культуры G1

Накопительная культура G2 представлена исключительно бактериями рода *Micrococcus*, доля которых составляет 100%. Доля неопределенных бактерий – 0,008%. Однако именно при добавлении этой культуры наблюдается интенсификация процесса извлечения золота из сланцев.

Результаты биовыщелачивания

В ходе экспериментов было выявлено, что концентрация золота в углесто-глинистых сланцах после процесса выщелачивания уменьшилась от 9,8 до 2,8 раз в различных условиях проведения эксперимента (с использованием метода стимулирования естественного микробиома и накопительных культур) (рис. 6).

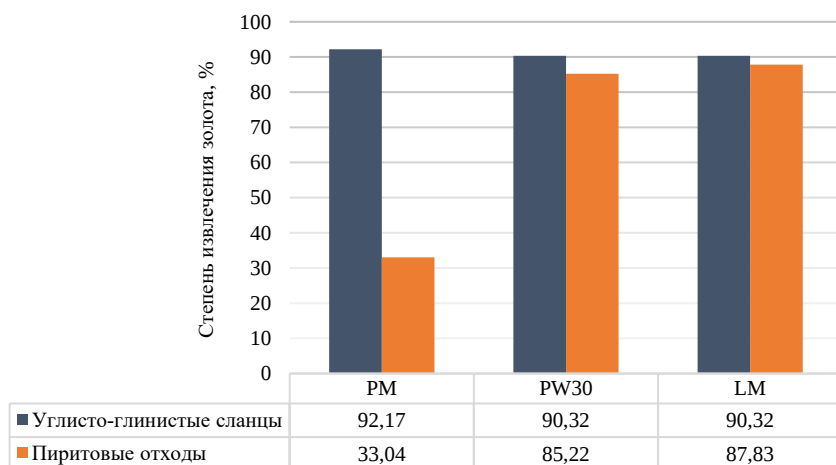


Рис. 6. Зависимость степени извлечения золота от применяемых сред

Однако метод выщелачивания существенно не повлиял на степень извлечения золота из исследуемых образцов руды. Наибольшая степень извлечения золота (92,17%) была достигнута при выдерживании сланцев в среде РМ, которая стимулирует естественный микробиом. При этом различия в составе сред РМ30 и LM не оказали значимого влияния на процесс биовыщелачивания (степень извлечения составила 90,32%).

В ходе экспериментов по извлечению золота из пиритового техногенного сырья путем стимуляции естественного микробиома было установлено, что концентрация золота в руде снижается от 1,5 до 8 раз. При этом степень извлечения существенно зависит от выбранной питательной среды (см. рис. 6). Наибольшая эффективность извлечения достигается при использовании сред РМ... РМ30... LM и составляет 33,04, 85,22, 87,83% соответственно.

Эти результаты могут быть объяснены составом питательных сред. Среда РМ содержит пептонную воду, однако для роста бактерий, населяющих поверхность пирита, вероятно, требуются неорганические компоненты, которые либо отсутствуют в пирите, либо недоступны для бактерий в этой форме. Эти компоненты присутствуют в средах РМ30 и LM, что способствует лучшему росту бактерий, являющихся частью микробиома пиритового техногенного сырья, и, как следствие, более эффективному извлечению золота из пирита.

При биовыщелачивании золота из сланцев накопительными культурами бактерий установлено, что консорциум G2 (91,24%) показал чуть лучшее биовыщелачивание в сравнении с консорциумом G1 (89,86%) (табл. 4). Возможно, такое небольшое преимущество консорциума G2 связано с тем, что изначально данный консорциум был получен на среде РМ30, на которой и проводили биовыщелачивание.

Таблица 4

Биовыщелачивание золота накопительными культурами бактериями из углисто-глинистых сланцев

Исходное	Содержание золота, г/т	
	G1	G2
2,17 ± 0,06	0,22 ± 0,006	0,19 ± 0,006

Эксперименты показали, что метод активации естественной микробиомы позволяет достичь максимальной эффективности биологического выщелачивания для обоих типов руд. При этом очевидно, что для каждого типа руды необходимо выбирать наиболее подходящий состав питательной среды, чтобы обеспечить максимальное извлечение золота с учетом изначального элементного состава руды.

Выводы

Изучен минеральный состав и показано, что основными составляющими вмещающей породы углисто-глинистых сланцев являются глинистые минералы типа иллит – 2M1, 2M2. Среднее содержание золота равно 2,20 г/т.

Золото, установленное в пробе, находится в свободной самородной форме. Оно находится в ассоциации с пиритом, марказитом и арсенидом железа типа лёлингита, но не арсенопирита, что может являться хорошим признаком отсутствия связанного Au в сульфидах.

Состав пиритового техногенного сырья в большей степени представлен сульфидом железа с повышенным содержанием кремния (8,6%), магния (4,2%), кальция (2,9%) и алюминия (2,6%). Среднее содержание золота составляет 1,15 г/т. При этом сырье представляет собой частично окисленные сульфидные минералы. Упорность пирита связана с тонкой вкрапленностью золота в пиритную матрицу.

На основании полученных результатов было проведено исследование возможности применения процесса биовыщелачивания для извлечения золота из золотоносных углисто-глинистых сланцев рудоносной зоны и пиритового техногенного сырья. Показана целесообразность создания оптимальных условий для развития естественной микробиомы руд с целью интенсификации процесса извлечения золота из руды.

Список источников

1. Шумилова Л.В., Хатькова А.Н., Размахин К.К., Простакишин М.Ф. Бесцианидная технология извлечения золота с применением методов интенсификации процесса выщелачивания // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 10-1. С. 328–344.
2. Василькова А.О., Бывальцев А.В., Хмельницкая О.Д., Войлошников Г.И. Разработка технологии извлечения золота из хвостов обогащения полиметаллических руд // iPolytech Journal. 2024. № 1. С. 139–148.
3. Усиков В.И., Липина Л.Н., Александров А.В., Корнеева С.И. Оценка влияния отходов горного производства на окружающую среду с применением ГИС технологий // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 12. С. 114–126.
4. Василькова А.О., Васильков Н.В., Хмельницкая О.Д., Войлошников Г.И. Анализ современного состояния способов переработки техногенного золотосодержащего сырья // iPolytech Journal. 2021. № 1. С. 97–107.
5. Tezyapar K.I., Kremser K., Wagland S.T., Coulon F. Bioleaching metal-bearing wastes and by-products for resource recovery: a review // Environ Chem Lett. 2023. Vol. 21. P. 3329–3350. doi: 10.1007/s10311-023-01611-4
6. Whitworth A.J., Forbes E., Verster I. et al. Review on advances in mineral processing technologies suitable for critical metal recovery from mining and processing wastes // Cleaner Engineering and Technology. 2022. Vol. 7. Art. 100451. doi: 10.1016/j.clet.2022.100451
7. Pineda Y.S., Devries S.L., Steiner N.C., Block-Cora K.A. Bioleaching of Gold in Mine Tailings by *Alcaligenes faecalis* // Minerals. 2023. Vol. 13 (3). Art. 410. doi: 10.3390/min13030410
8. Pourhossein F., Mousavi S.M. Improvement of gold bioleaching extraction from waste telecommunication printed circuit boards using biogenic thiosulfate by *Acidithiobacillus thiooxidans* // Journal of Hazardous Materials. 2023. Vol. 450. Art. 131073. doi: 10.1016/j.jhazmat.2023.131073
9. Vera M., Schippers A., Hedrich S., Sand W. Progress in bioleaching: fundamentals and mechanisms of microbial metal sulfide oxidation – part A // Applied Microbiology and Biotechnology. 2022. Vol. 106. P. 6933–6952. doi: 10.1007/s00253-022-12168-7
10. Li J., Wen J., Guo Y. et al. Bioleaching of gold from waste printed circuit boards by alkali-tolerant *Pseudomonas fluorescens* // Hydrometallurgy. 2020. Vol. 194. Art. 105260. doi: 10.1016/j.hydromet.2020.105260

11. Sarkodie E.K., Jiang L., Li K. et al. A review on the bioleaching of toxic metal(loid)s from contaminated soil: Insight into the mechanism of action and the role of influencing factors // *Front Microbiol.* 2022. Vol. 13. Art. 1049277. doi: 10.3389/fmicb.2022.1049277

References

1. Shumilova L.V., Xat'kova A.N., Razmaxin K.K., Prostakishin M.F. Bescianidnaya texnologiya izvlecheniya zolota s primeneniem metodov intensivizatsii processa vy'shela-chivaniya [Cyanide-free gold extraction technology using methods of intensification of the leaching process]. *Mining informational and analytical bulletin.* 2023, 10-1, 328–344.
2. Vasil'kova A.O., By'val'cev A.V., Xmel'niczkaya O.D., Vojloshnikov G.I. Razrabotka texnologii izvlecheniya zolota iz xvostov obogashheniya polimetallicheskix rud [A technology for gold extraction from tailings resulting from polymetallic ore beneficiation]. *iPolytech Journal.* 2024, 1, 139–148.
3. Usikov V.I., Lipina L.N., Aleksandrov A.V., Korneeva S.I. Ocenka vliyaniya otxodov gornogo proizvodstva na okruzhayushchuyu sredu s primeneniem GIS texnologij [Evaluation of environment-tal impact of mining waste using GIS technologies]. *Mining informational and analytical bulletin.* 2019, 12, 114–126.
4. Vasil'kova A.O., Vasil'kov N.V., Xmel'niczkaya O.D., Vojloshnikov G.I. Analiz sovremen-nogo sostoyaniya sposobov pererabotki texnogen-nogo zolotosoderzhashhego sy'r'ya [Analysis of the current state of technologies in the field of recycling technogenic gold-containing raw materials]. *iPolytech Journal.* 2021, 1, 97–107.
5. Tezyapar, K.I.; Kremser, K.; Wagland, S.T.; Coulon, F. Bioleaching metal-bearing wastes and by-products for resource recovery: a review. *Environ Chem Lett.* 2023, 21, 3329–3350. doi:10.1007/s10311-023-01611-4.
6. Whitworth, A.J.; Forbes, E.; Verster, I. et al. Review on advances in mineral processing technologies suitable for critical metal recovery from mining and processing wastes. *Cleaner Engineering and Technology.* 2022, 7, 100451. doi:10.1016/j.clet.2022.100451.
7. Pineda, Y.S.; Devries, S.L.; Steiner, N.C.; Block-Cora, K.A. Bioleaching of Gold in Mine Tailings by *Alcaligenes faecalis*. *Minerals.* 2023, 13(3), 410. doi:10.3390/min13030410.
8. Pourhossein, F.; Mousavi, S.M. Improvement of gold bioleaching extraction from waste telecommunication printed circuit boards using biogenic thiosulfate by *Acidithiobacillus thiooxidans*. *Journal of Hazardous Materials.* 2023, 450, 131073. doi:10.1016/j.jhazmat.2023.131073.
9. Vera, M.; Schippers, A.; Hedrich, S.; Sand, W. Progress in bioleaching: fundamentals and mechanisms of microbial metal sulfide oxidation – part A. *Applied Microbiology and Bio-technology.* 2022, 106, 6933–6952. doi:10.1007/s00253-022-12168-7.
10. Li, J.; Wen, J.; Guo, Y. et al. Bioleaching of gold from waste printed circuit boards by alkali-tolerant *Pseudomonas fluorescens*. *Hydrometallurgy.* 2020, 194, 105260. doi: 10.1016/j.hydromet.2020.105260.
11. Sarkodie, E.K.; Jiang, L.; Li, K. et al. A review on the bioleaching of toxic metal(loid)s from contaminated soil: Insight into the mechanism of action and the role of influencing factors. *Front Microbiol.* 2022, 13, 1049277. doi:10.3389/fmicb.2022.1049277.

Сведения об авторах:

Сачков Виктор Иванович – доцент, доктор химических наук, заведующий лабораторией «Инновационно-технологический центр» Сибирского физико-технического института Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: vicsachkov@gmail.com

Луцаева Инна Владимировна – доцент, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Биологического института Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: luschaeva@mail.ru

Дайбова Елена Борисовна – кандидат химических наук, заведующая лабораторно-аналитическим центром Сибирского научно-исследовательского института сельского хозяйства и торфа – филиала СФНЦА РАН (Томск, Россия). E-mail: edaibova@yandex.ru

Медведев Родион Олегович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Инновационно-технологический центр» Сибирского физико-технического института Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: mail@rodionmedvedev.ru

Сусид Максим Владимирович – студент Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: mattakushi86@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Sachkov Viktor I. – Docent, D.Sc. of Chemical Sciences, Head of the laboratory “Innovation and Technology Center”, Siberian Physical-Technical Institute of the Tomsk State University (Tomsk, Russia). E-mail: vicsachkov@gmail.com

Lushchaeva Inna V. – Docent, Ph.D. of Biological Sciences, Senior Researcher Officer, Biology Institute of the Tomsk State University (Tomsk, Russia). E-mail: luschaeva@mail.ru

Daibova Elena B. – Ph.D. of Chemical Sciences, Head of the Laboratory and Analytical Center of the Siberian Research Institute of Agriculture and Peat – branch of the Siberian Federal Scientific Center of Agro-Bio Technologies of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia). E-mail: edaibova@yandex.ru

Medvedev Rodion O. – Ph.D. of Engineering Sciences, Senior Researcher Officer of the laboratory “Innovation and Technology Center”, Siberian Physical-Technical Institute of the Tomsk State University (Tomsk, Russia). E-mail: mail@rodionmedvedev.ru

Susid Maksim V. – Student, Tomsk State University (Tomsk, Russia). E-mail: mattakushi86@mail.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.07.2024; принята к публикации 04.04.2025
The article was submitted 10.07.2024; accepted for publication 04.04.2025