

СТАТЬИ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

ПРОМЫШЛЕННОСТЬ И ПРОИЗВОДСТВО

НЕФТЯНАЯ И ГАЗОВАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ. ПЕРЕРАБОТКА УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ

Статья поступила в редакцию: 07.08.2026

Статья принята к публикации: 08.09.2026

Статья опубликована: 28.09.2026

УДК 622.765+546.3+549.09

Исследование химического и минералогического состава техногенных отходов медно-обогатительного комбината

Абдиразакوف Акмал Ибрагимович
доц.

Каршинский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Карши

E-mail: abdirazakov34@gmail.com

Маллаев Шамшод Обиджон угли
ассистент

Каршинский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Карши

Турдиев Фарид Раззок угли
ассистент

Каршинский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Карши

Библиографическое описание: Абдиразакوف А.И., Маллаев Ш.О.У., Турдиев Ф.Р.У. Исследование химического и минералогического состава техногенных отходов медно-обогатительного комбината // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 9(150). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23384>

Study of the chemical and mineralogical composition of man-made waste from a copper processing plant

Abdirazakov Akmal Ibragimovich

Associate Professor

Karshi State Technical University

Republic of Uzbekistan, Karshi

Mallayev Shamshod Obidjon o'g'li

Assistant

Karshi State Technical University

Republic of Uzbekistan, Karshi

Turdiyev Farid Razzoq o'g'li

Assistant

Karshi State Technical University

Republic of Uzbekistan, Karshi

Аннотация

В данной статье рассматриваются методы извлечения меди в условиях Алмалыкского горно-металлургического комбината в нашей стране, а также тот факт, что после извлечения 60 – 70 % меди из состава 2-го медеобогащающего комбината (МБК) ежегодно образуются десятки миллионов тонн техногенных отходов и Для изучения состава этих отходов использовались следующие методы: с помощью современных высокоточных инструментальных методов (рентгенофлуоресцентная спектрометрия (Shimadzu EDX-7000), сканирующая электронная микроскопия (JEOL JSM-IT200, Zeiss EVO MA 10), рентгеновская дифрактометрия (Shimadzu XRD-6100), энергодисперсионный спектрометр (EDS), атомно-абсорбционная спектрометрия (Shimadzu AA-7000) и ICP-MS (Agilent 7900)), был проведен количественный химический, минералогический и фазовый анализ драгоценных металлов, таких как медь, золото, серебро, селен, а также представлена последовательность применения высокоточного лабораторного оборудования для определения содержания золота, серебра и меди. В результате этих анализов было доказано, почему золото, серебро и медь в процессе флотации попадали в состав отходов, а не в концентрат. Эти анализы выявили актуальность разработки экологически чистых и недорогих методов селективного разделения, способных заменить традиционные методы разделения цветных и редких металлов.

Abstract

This article discusses the methods of copper extraction at the Almalyk Mining and Metallurgical Plant in our country, as well as the fact that after extracting 60 – 70 % of copper from the 2nd Copper Processing Plant (CPP), tens of millions of tons of man-made waste are generated annually and To study the composition of these wastes, the following methods were used: using modern high-precision instrumental methods (X-ray fluorescence spectrometry (Shimadzu EDX-7000), scanning electron microscopy (JEOL JSM-IT200, Zeiss EVO MA 10), X-ray diffractometry (Shimadzu XRD-6100), energy dispersive spectrometer (EDS), atomic absorption spectrometry (Shimadzu AA-7000) and ICP-MS (Agilent 7900)), a quantitative chemical, mineralogical and phase analysis of precious metals such as copper, gold, silver, selenium was

carried out, and a sequence was presented The use of high-precision laboratory equipment to determine the gold, silver, and copper content was used. These analyses demonstrated why gold, silver, and copper were being processed as waste rather than concentrate during flotation. These analyses highlighted the urgent need to develop environmentally friendly and inexpensive selective separation methods capable of replacing traditional methods for separating non-ferrous and rare metals.

Ключевые слова: техногенных отходов, драгоценных металлов, флотационного обогащения, химический, минералогический, фазовый, анализ образцов, спектроскопии, оксидные минерал, спектрометр концентрат, гидрометаллургия.

Keywords: man-made waste, precious metals, flotation enrichment, chemical, mineralogical, phase, sample analysis, spectroscopy, oxide mineral, spectrometer concentrate, hydrometallurgy.

Введение

В результате деятельности горнодобывающих и металлургических предприятий Республики Узбекистан накоплены значительные объёмы техногенных отходов, содержащих цветные, благородные и редкие металлы [2]. Согласно данным исследований [1], на Алмалыкском горно-металлургическом комбинате (АГМК) объём отходов флотационного обогащения составляет порядка 955–960 млн тонн, а отходы медеплавильного производства оцениваются в 11–13 млн тонн. В составе этих отходов содержание меди колеблется от 0,11 % до 5,04 %, а также присутствуют золото, серебро, свинец и цинк [1]. В соответствии с Постановлением Президента Республики Узбекистан № ПК-5159 от 24 июня 2021 года и Стратегией развития нового Узбекистана на 2022–2026 годы (Указ № ПФ-60 от 28 января 2022 г.) перед горно-металлургической отраслью поставлены задачи глубокой переработки местного сырья и вовлечения техногенных отходов в хозяйственный оборот по принципу «от сырья к готовой продукции» [2]. Решение этих задач требует детального изучения вещественного состава отходов, форм нахождения ценных компонентов и их распределения по минеральным фазам [10].

Целью настоящей работы являлось комплексное исследование химического, минералогического и фазового состава техногенных отходов 2-го МОК АО «Алмалыкский ГМК» с определением содержания меди, золота, серебра и сопутствующих элементов, а также установлением причин перехода ценных металлов в отходы при флотационном обогащении. Результаты исследования послужат основой для выбора рациональной технологии переработки техногенного сырья [9].

Материалы и методы

Объект исследования. В качестве объекта исследования использованы пробы техногенных отходов, отобранные с поверхности и с различных глубин полигона № 2 2-го медеобогатительного комбината (МОК) АО «Алмалыкский горно-металлургический комбинат». Отбор проб осуществлялся в соответствии с общепринятыми методиками опробования техногенных месторождений [1]. Для обеспечения репрезентативности

исходный материал был подвергнут квартованию, после чего сформированы две объединённые пробы (шихты № 1 и № 2), которые подвергались всем последующим видам анализа.

Методы исследования

Для решения поставленных задач применялся комплекс современных высокоточных инструментальных методов [10]:

1. Рентгенофлуоресцентная спектрометрия (XRF) – выполнялась на спектрометре Shimadzu EDX-7000 для определения валового содержания основных и второстепенных элементов в пробах. Дополнительно использовался энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный спектрометр [10].

2. Атомно-абсорбционная спектрометрия (AAS) – проводилась на приборе Shimadzu AA-7000 для количественного определения содержания цветных металлов (Cu, Zn, Pb) после кислотного разложения проб [5].

3. Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) – использовалась на Agilent 7900 для определения микро- и примесных элементов, включая редкие и рассеянные металлы [3].

4. Рентгеновская дифрактометрия (XRD) – выполнялась на дифрактометре Shimadzu XRD-6100 для идентификации кристаллических фаз и минерального состава отходов [10].

5. Сканирующая электронная микроскопия (SEM) – проводилась на микроскопах JEOL JSM-IT200 и Zeiss EVO MA 10 для изучения морфологии частиц, их размера и взаимного расположения минеральных фаз [5].

6. Энергодисперсионная спектроскопия (EDS) – реализована на базе SEM (Aztec Energy Advanced X-Act, Oxford Instruments) для локального элементного анализа отдельных минеральных зёрен и выявления ассоциаций ценных элементов с вмещающими минералами [3].

7. Пробирный анализ – использован для определения содержания золота и серебра по методике ISO 10378:2016 [5].

Для каждого вида анализа подготовлены отдельные навески проб в соответствии с требованиями нормативной документации и инструкций к приборам.

Результаты и обсуждение

Химический состав техногенных отходов. Результаты рентгенофлуоресцентного и атомно-абсорбционного анализа объединённых проб представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Химический состав техногенных отходов 2-го медеобогатительного комбината (шихта № 1)

№ п/п	Элемент/оксид	Содержание, %	№ п/п	Элемент/оксид	Содержание, %
1	Cu	0,76	10	Na ₂ O	0,96
2	Zn	0,64	11	MnO	0,012
3	Fe	37,8	12	P ₂ O ₅	0,085
4	Pb	0,20	13	K ₂ O	2,75

№ п/п	Элемент/оксид	Содержание, %	№ п/п	Элемент/оксид	Содержание, %
5	S	1,10	14	CaO	1,54
6	MgO	1,30	15	TiO ₂	0,173
7	Al ₂ O ₃	4,50	16	As	0,0037
8	ZrO	0,0457	17	Au, г/т	0,40
9	SiO ₂	34,80	18	Ag, г/т	3,80

Анализ данных таблицы 1 показывает, что основными компонентами отходов являются железо (37,8 %), диоксид кремния (34,8 %) и оксид алюминия (4,5 %), что характерно для отходов переработки сульфидных медно-порфировых руд [6]. Содержание меди составляет 0,76 %, цинка – 0,64 %, свинца – 0,20 %, серы – 1,10 %. Содержание золота (0,40 г/т) и серебра (3,80 г/т) свидетельствует о наличии промышленно значимых концентраций благородных металлов [1]. В пробах также идентифицированы микро- и примесные элементы: титан, марганец, мышьяк, цирконий, барий, кобальт, ванадий, сурьма, рубидий и др. [3].

Для более детального изучения форм нахождения меди выполнен дополнительный анализ шихты № 2. На рис. 1 представлены результаты рентгенофлуоресцентного анализа шихты № 2, на котором отчётливо видны пики, соответствующие меди (Cu), железу (Fe), цинку (Zn), свинцу (Pb), а также кремнию, алюминию и другим элементам. Установлено, что медь в отходах присутствует как в сульфидной, так и в оксидной формах. Содержание CuO в шихте № 2 составило 0,55 %, что подтверждает, что оксидные соединения меди не извлекаются в процессе сульфидной флотации и переходят в отходы [6]. Этот результат согласуется с данными, приведёнными в работах [1, 10].

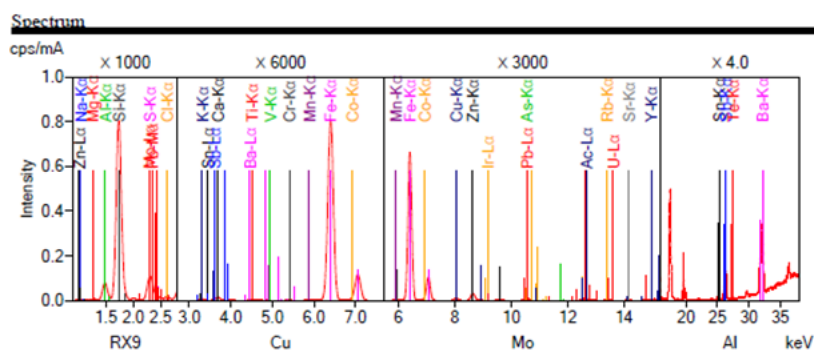


Рисунок 1. Спектр рентгенофлуоресцентного анализа шихты № 2

Минералогический и фазовый состав. Рентгеновская дифрактометрия (XRD) позволила идентифицировать основные минеральные фазы, присутствующие в отходах: кварц (SiO₂), гематит (Fe₂O₃), магнетит (Fe₃O₄), халькопирит (CuFeS₂), халькоцит (Cu₂S), сфалерит (ZnS), галенит (PbS), а также продукты их окисления – оксиды и гидроксиды железа, гипс (CaSO₄·2H₂O) и др. [10, 6].

Структурный анализ показал, что основная масса отходов представлена тонкодисперсными агрегатами с размером частиц от 10 до 200 мкм. Оксидные минералы (PbO, CuO) фиксируются в виде самостоятельных фаз и в составе сложных железистых агрегатов [3].

Изучение морфологии и элементных ассоциаций методом SEM–EDS. Для визуализации распределения ценных компонентов и выявления их связей с вмещающими минералами проведены исследования на сканирующих электронных микроскопах JSM-IT200 и Zeiss EVO MA 10 с EDS-приставками [5, 3].

На рис. 2 представлены SEM-изображения отходов при увеличении 110 крат, на которых видны зоны локализации металлов. Видно, что частицы имеют неправильную форму и неоднородную структуру, что характерно для продуктов измельчения и флотации. Более светлые участки соответствуют минералам с высоким средним атомным номером (сульфиды, оксиды железа), тёмные – силикатной матрице.

EDS-анализ характерных зон (рис. 3) показал, что в участках с высоким содержанием кислорода регистрируются сигналы Fe, Ti, Ca и Si, что соответствует оксидным и силикатным фазам [5]. При этом в оксидных железистых образованиях обнаружены включения меди, свинца и цинка, что указывает на срастание сульфидных минералов с оксидами железа.

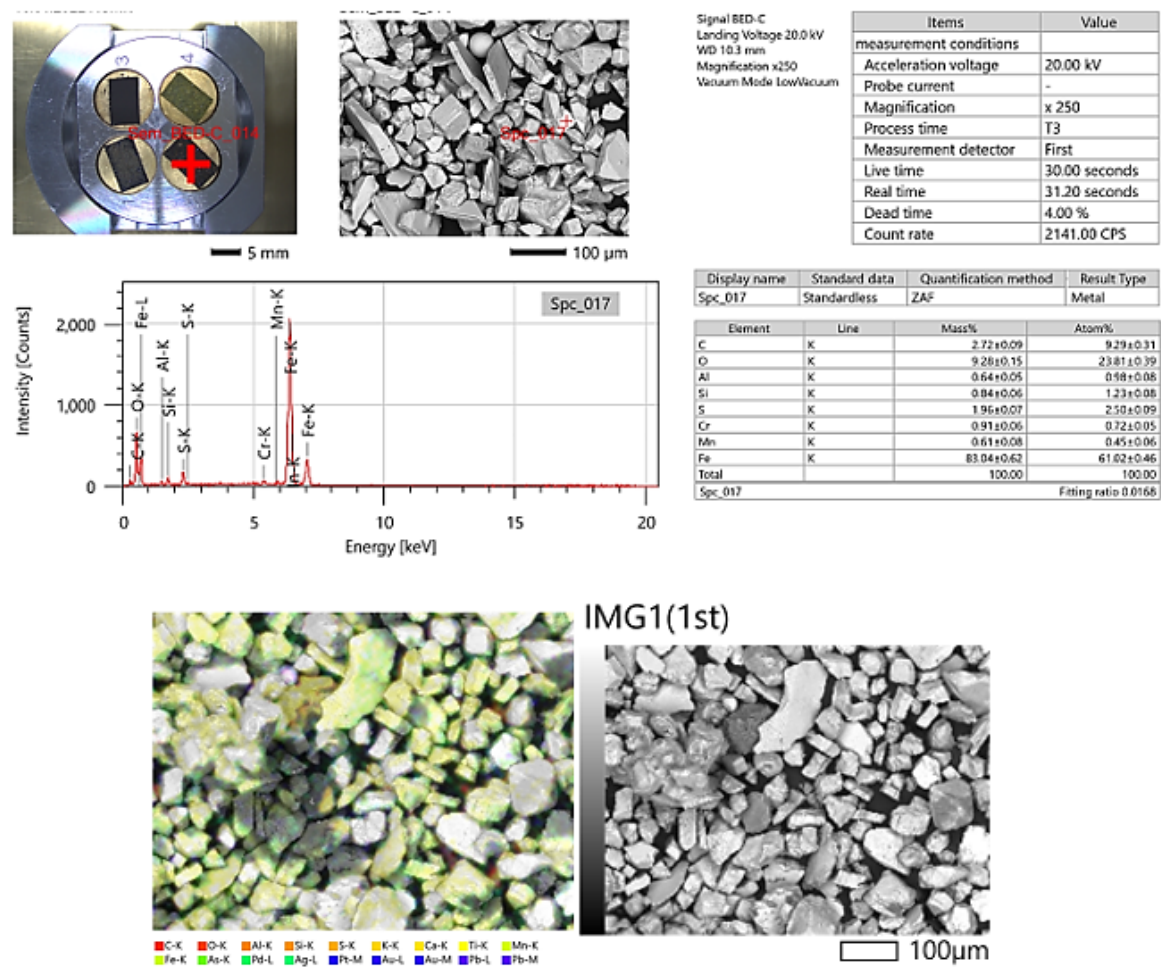


Рисунок 2. SEM-изображения отходов 2-го МОК при увеличении ×110

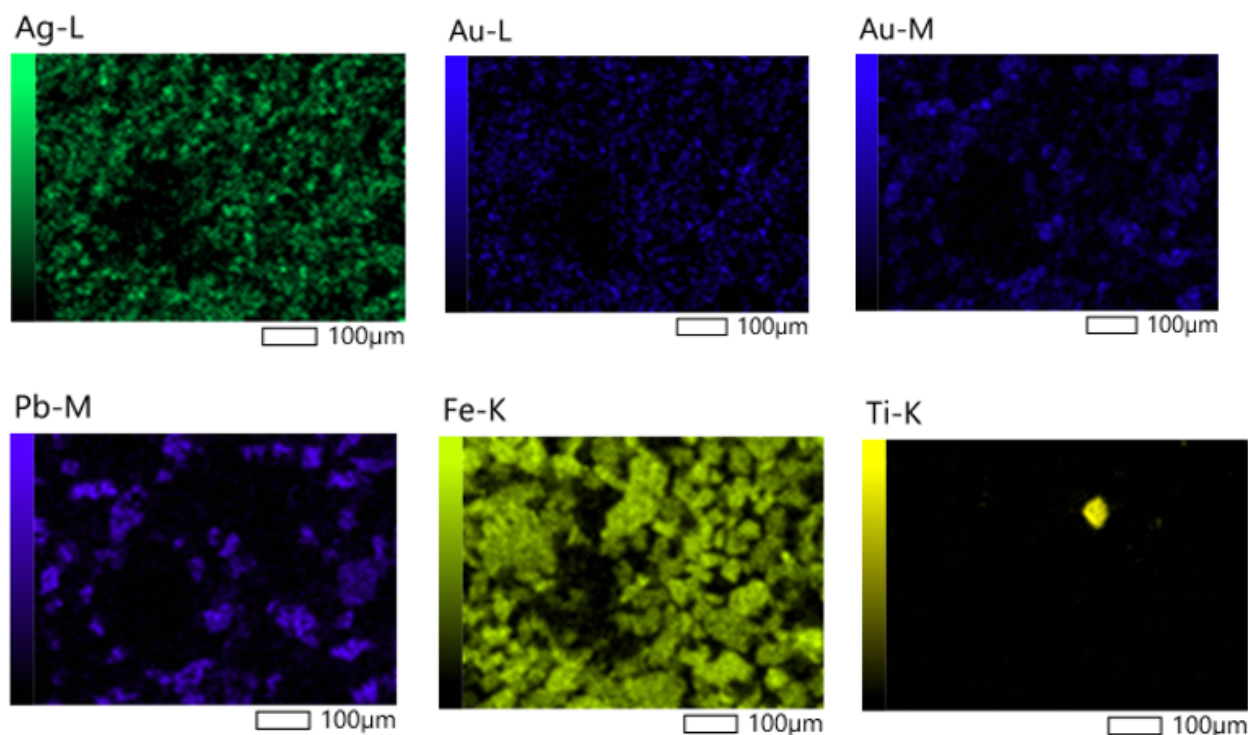


Рисунок 3. Результаты элементного анализа отходов МОК-2, образец 2

Особое внимание уделено определению форм нахождения золота и серебра. Поскольку спектральные сигналы Au и Ag в EDS близки, использовалось разрешение по L-линии золота и K-линии серебра [5]. На рис. 4 приведены карты распределения элементов (SEM–EDS-картирование), подтверждающие соминерализацию золота и серебра с кварцем, пиритом и магнетитом [3, 4]. Установлено, что благородные металлы находятся преимущественно в виде тонкодисперсных включений (менее 5 мкм) в сульфидных и оксидных фазах, либо в виде твёрдых растворов в кристаллической решётке пирита [6].

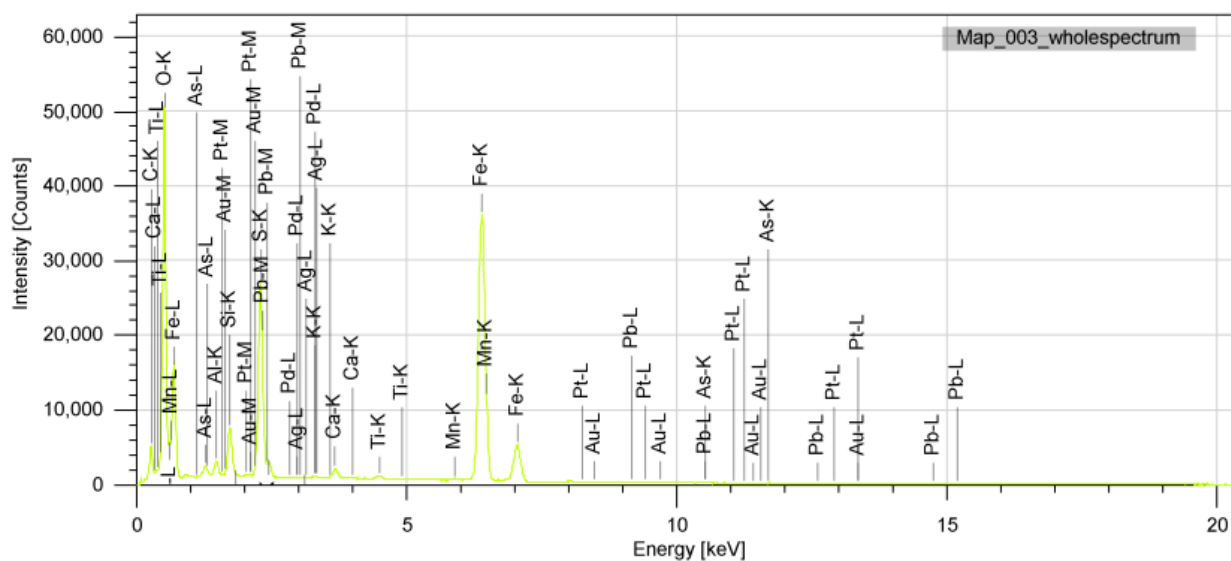


Рисунок 4. Общий элементный анализ образца 2-МОК

Результаты SEM–EDS также показали, что свинец присутствует в отходах в виде окисленных форм галенита (PbO), а не в сульфидной форме (PbS). Это объясняет, почему при селективной флотации на 2-МОК, ориентированной на сульфидные минералы меди, молибдена и железа, оксидные соединения свинца не переходят в концентрат и накапливаются в хвостах [1].

Таким образом, проведённый комплекс анализов показал, что основными причинами потерь ценных металлов в отходах являются:

1. Присутствие меди в оксидных формах, не флотируемых сульфидными собирателями [6];
2. Наличие свинца в виде PbO [10, 6];
3. Тонкая вкрапленность золота и серебра в пирит и оксиды железа, а также их сростание с кварцем [4];
4. Низкая степень раскрытия минеральных зёрен при существующей технологии измельчения [1].

Эти факторы делают традиционную флотацию малоэффективной для переработки данных отходов и обосновывают необходимость применения гравитационных методов для предварительного обогащения с последующим гидрометаллургическим вскрытием (например, кислотным выщелачиванием, цианированием или биовыщелачиванием) [3, 4]. Кроме того, в составе отходов выявлены следовые концентрации селена, теллура, кобальта, никеля и молибдена, что открывает перспективы комплексного извлечения редких элементов [10, 3].

Заключение

1. Проведённые исследования с использованием современных высокоточных инструментальных методов (XRF, AAS, ICP-MS, XRD, SEM–EDS) позволили получить достоверные данные о химическом, минералогическом и фазовом составе техногенных отходов 2-го МОК АО «Алмалыкский ГМК» [10, 5]. Установлено, что отходы являются полиэлементным техногенным сырьём, содержащим железо (37,8 %), кремний (34,8 %), алюминий (4,5 %), а также цветные и благородные металлы: Cu – 0,76 %, Zn – 0,64 %, Pb – 0,20 %, Au – 0,4 г/т, Ag – 3,8 г/т (таблица 1). Эти данные согласуются с результатами исследований состава техногенных отходов АГМК, приведёнными в работе [1].

2. Минералогическими и фазовыми методами подтверждено, что медь в отходах присутствует как в сульфидной (халькопирит, халькоцит), так и в оксидной (CuO) формах, причём оксидные соединения являются основной причиной потерь меди при сульфидной флотации [6]. Свинец также находится преимущественно в оксидной форме (PbO), что препятствует его переходу в концентрат [10].

3. Установлено, что золото и серебро в отходах ассоциированы с кварцем, пиритом и магнетитом, образуя тонкодисперсные включения размером менее 5 мкм, а также частично входя в кристаллическую решётку пирита и оксидов железа [4]. Эта особенность является главной причиной их перехода в хвосты флотации.

4. Выявленные минералогические характеристики (преобладание оксидных форм, тонкая вкрапленность благородных металлов, наличие сложных сростков) определяют неэффективность традиционных флотационных методов для переработки данных техногенных отходов [1, 6].

5. Практическая значимость работы заключается в обосновании рациональных технологических направлений дальнейшей переработки отходов: предварительное гравитационное обогащение с последующим гидрометаллургическим вскрытием (кислотным выщелачиванием, цианированием или биовыщелачиванием) позволяет обеспечить высокие показатели извлечения цветных, благородных и редких металлов [3, 4]. Кроме того, в составе отходов обнаружены следовые количества селена, теллура, кобальта, никеля и молибдена, что делает целесообразным исследование комплексного извлечения этих элементов в рамках единой технологической схемы [10, 3].

Список литературы

1. Мирзажанова С., Мансурова Д., Боймирзаева Ж., Яркулова Н., Наврузова М. Виды техногенных отходов, образующихся в процессе производства меди, и их химико-аналитический состав // Горные машины и технологии. – 2026. – № 1. – С. 45–54.
2. Указ Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 г. № ПФ-60 «О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022–2026 годы».
3. Altinkaya P., Liipo J., Kolehmainen E., Haapalainen M., Leikola M., Lundström M. Leaching of trace amounts of metals from flotation tailings in cupric chloride solutions // Mining, Metallurgy & Exploration. – 2019. – Т. 36, № 2. – P. 335–342. – DOI: 10.1007/s42461-018-0015-9.
4. Coca Y. Laser-induced surface vitrification for the sustainable stabilization of copper tailings // Sustainability. – 2025. – Т. 17, № 13. – Art. 5676. – P. 1–17. – DOI: 10.3390/su17135676.
5. International Organization for Standardization. ISO 10378:2016. Copper, lead and zinc sulfide concentrates – Determination of gold and silver – Fire assay gravimetric and flame atomic absorption spectrometric method. – Geneva: ISO, 2016. – 50 P.
6. Mukhamedzhanova S. et al. Improvement of the technology of copper production by involving in the processing of industrial waste JSC «Almalyk MMC» in Uzbekistan // International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry «Interagromash». – 2022. – P. 2193–2199.
7. Ochildiev K., Mukhametjanova S., Matkarimov S., Nosirkhujaev S., Ismailov J., Nizamova A. Thermodynamic principles of the process of reduction of metal oxides in copper industrial converter slags using clinker // E3S Web of Conferences. – 2025. – Т. 632. – Art. 04008. – DOI: 10.1051/e3sconf/202563204008.
8. Priya J., Jain M.K., Randhawa N.S. Comprehensive physicochemical characterization and property-process matrix for valorizing copper extraction wastes: enabling technology selection and screening-level resource classification // Cleaner Engineering and Technology. – 2026. – Т. 33. – Art. 101281. – DOI: 10.1016/j.clet.2026.101281.

9. Valiyev Kh., Bugubaeva A., Nechaeva A., Artykova A., Melamud V., Stom D., Boduen A., Bulaev A. The development of innovated complex process for treatment of old flotation tailings of copper-zinc sulfide ore // *Molecules*. – 2024. – Т. 29, № 7. – Art. 1550. – DOI: 10.3390/molecules29071550.
10. Vokhidov B.R. New horizons processing of technogenic waste of the copper industry // *The American Journal of Applied Sciences*. – 2022. – Т. 4, № 5. – P. 42–51.

References

1. Mirzazhanova S., Mansurova D., Bojmirzaeva Zh., Yarkulova N., Navruzova M. [Types of Technogenic Waste Generated in Copper Production Processes and Their Chemical-Analytical Composition] // *Gornye mashiny i tekhnologii*. – 2026. – No. 1 – URL: <http://mining.tdtu.uz/index.php/journal/article/view/233> (дата обращения: 08.09.2026). (In Russ.)
2. [Decree of the President of the Republic of Uzbekistan of January 28, 2022 No. PF-60 'On the Development Strategy of New Uzbekistan for 2022–2026'] (In Russ.)
3. Rintala L., Leikola M., Saukko P., Lundström M. Leaching of trace amounts of metals from flotation tailings in cupric chloride solutions // *Mining, Metallurgy & Exploration*. – 2019. – DOI: 10.1007/s42461-018-0015-9.
4. Laser-Induced Surface Vittrification for the Sustainable Stabilization of Copper Tailings // *Sustainability*. – 2025. – Vol. 17, No. 13. – Art. 5676. – DOI: 10.3390/su17135676.
5. International Organization for Standardization. ISO 10378:2016. Copper, lead and zinc sulfide concentrates – Determination of gold and silver – Fire assay gravimetric and flame atomic absorption spectrometric method. – Geneva: ISO, 2016. – 50 P.
6. Mukhamedzhanova S. et al. Improvement of the Technology of Copper Production by Involving in the Processing of Industrial Waste JSC “Almalyk MMC” in Uzbekistan // *International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry “Interagromash”*. – 2022.
7. Ochildiev K., Mukhametjanova S., Matkarimov S., Nosirkhujaev S., Ismailov J., Nizamova A. Thermodynamic principles of the process of reduction of metal oxides in copper industrial converter slags using clinker // *E3S Web of Conferences*. – 2025. – Vol. 632. – Art. 04008. – DOI: 10.1051/e3sconf/202563204008.
8. Priya J., Jain M.K., Randhawa N.S. Comprehensive Physicochemical Characterization and Property-Process Matrix for Valorizing Copper Extraction Wastes: Enabling Technology Selection and Screening-Level Resource Classification // *Cleaner Engineering and Technology*. – 2026.
9. Valiyev Kh., Bugubaeva A., Nechaeva A., Artykova A., Melamud V., Stom D., Boduen A., Bulaev A. The Development of Innovated Complex Process for Treatment of Old Flotation Tailings of Copper-Zinc Sulfide Ore // *Molecules*. – 2024. – Vol. 29, No. 7. – DOI: 10.3390/molecules29071550.
10. Vokhidov B.R. New horizons processing of technogenic waste of the copper industry // *The American Journal of Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 4, No. 5.