

<https://doi.org/10.51301/ejsu.2023.i3.01>

## Physico-chemical studies of technogenic gold-containing wastes of the Aksu deposit

N.K. Kazieva<sup>1</sup>, N.V. Seraya<sup>1</sup>, S.B. Yulussov<sup>2</sup>, A.T. Khabiyev<sup>2</sup>, Y.S. Merkitabeyev<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust'-Kamenogorsk, Kazakhstan

<sup>2</sup>Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

\*Corresponding author: [y.merkibayev@satbayev.university](mailto:y.merkibayev@satbayev.university)

**Abstract.** To develop a comprehensive technology for processing technogenic gold-containing waste, a representative sample of technogenic mineral formations of the Aksu deposits was selected. The average representative sample was studied using chemical, X-ray phase, mineralogical, X-ray spectral and electron microscopic analysis methods. The article presents physico-chemical studies of gold-bearing technogenic mineral formations of the Aksu deposit. According to the results of X-ray phase analysis, it was found that the main phase components are the following minerals:  $\alpha$ -quartz - 63.2%, barite - 26.8%, muscovite - 6.3% and gypsum - 3.8%. Electron probe scanning revealed the presence of gold in the form of thin inclusions in rock-forming minerals. With the help of rational analysis, it was found that the proportion of free gold in the form of accretions with ore components in them is 7.18%. It was found that the main part of gold - 64.7% - is in the sulfide sample in the form of films coated with quartz, iron hydroxides, carbonates, chlorites and other minerals. According to the results of assay and atomic adsorption, gold in technogenic mineral formations varies from 1.11 to 1.28 g/t. The sieve analysis of technogenic mineral formations of the Aksu deposit showed that the initial sample is mainly represented by a class of  $-0.25+0.074$  mm.

Based on the data of analytical studies, it can be seen that the studied samples of stale tails of TMOS are a rather complex object for extracting gold, which is associated with the above-described features of the material composition. As well as the thin inclusiveness of gold in sulfides determine the persistent nature of the raw material under study.

The results obtained in the physico-chemical study of technogenic mineral formations of the Aksu deposit will become the basis for choosing the technology for processing this raw material.

**Keywords:** *technogenic waste, gold, material composition, tailings, tailings of enrichment.*

### 1. Введение

Техногенные золотосодержащие отходы - это отходы, образующиеся в результате промышленных или технологических процессов, связанных с добычей, переработкой, использованием или утилизацией золота или золотосодержащих материалов. Они могут включать в себя различные типы отходов и материалов, содержащих золото. Некоторые примеры техногенных золотосодержащих отходов включают: шламы и отходы гидрометаллургических процессов, отходы от обработки электроники, отработанные катализаторы, шлаки и отходы плавки, отходы от ювелирной промышленности. Шламы и отходы гидрометаллургических процессов получаются в результате обработки золотосодержащей руды с использованием растворов или химических реагентов. Это могут быть шламы от цианидации, флотации или других процессов обработки. Отходы от обработки электроники производятся при разборке или утилизации отработанной электроники, такой как компьютеры, мобильные телефоны и платы, образуются отходы, содержащие золото. Это могут быть контакты, покрытия и другие компоненты с нанесенным золотом. Отработанные катализаторы появляются в некоторых процессах производства, таких как химическая промышленность или нефтепереработка, используются катализаторы, содержащие золото. После их исполь-

зования они могут стать техногенными золотосодержащими отходами. Шлаки и отходы плавки являются побочными продуктами при плавке золотосодержащих материалов, таких как концентраты руды или отработанные ювелирные изделия, образуются шлаки и плавы, содержащие золото в остаточной форме. Отходы от ювелирной промышленности представляют собой продукты, образованные в процессе обработки золота в ювелирной промышленности образуются отходы, такие как обрезки, пыль или остатки от обработки ювелирных изделий.

Исследования техногенных золотосодержащих отходов направлены на исследование и оптимизацию методов извлечения и переработки золота из этих отходов, а также на оценку их потенциала для утилизации.

Физико-химические исследования техногенных золотосодержащих отходов включают изучение их химического состава, физических свойств, минералогического состава и возможностей извлечения золота из этих отходов. Для проведения химического анализа используются различные методы химического анализа, такие как волочный анализ, рентгеноструктурный анализ и спектральный анализ, можно определить содержание золота и других химических элементов в отходах. Это поможет оценить их потенциал для извлечения золота и определить оптимальные методы обработки. Для изучения физических свойств проводят измерение физических свойств

отходов, таких как плотность, твердость, магнитные свойства и теплопроводность, которые могут дать информацию о физической природе отходов и помочь в планировании процессов обогащения и извлечения золота. Исследование минералогического состава отходов позволяет определить присутствие минералов, содержащих золото, и их распределение. Методы, такие как оптическая микроскопия, рентгеноструктурный анализ и сканирующая электронная микроскопия, могут быть использованы для идентификации минералов и анализа их микроструктуры. Для извлечения золота из техногенных отходов определяют наиболее эффективные методы извлечения, которые включают разработку и оптимизацию различных процессов, таких как гидрометаллургические методы (цианидация, хлорирование) и пирометаллургические методы (плавление и обжиг). Физико-химические исследования также могут помочь в оценке экологической безопасности техногенных золотосодержащих отходов.

Развитие горно-металлургической промышленности повлекло за собой образование отвалов вскрышных пород, хвостов обогатительных фабрик, металлургических шлаков и других отходов производства в количествах, которые позволяют классифицировать эти новообразования как техногенные месторождения [1]. Ресурсную ценность техногенных месторождений нельзя оценивать привычными категориями содержания в них полезных компонентов, поскольку выделение ценных компонентов, как правило, затруднено и существующие технологические процессы извлечения не позволяют их перерабатывать в достаточной мере [2]. Показатели обогащения такого сырья невысокие даже при значительных затратах на технологию. Рассматривать вопрос о целесообразности переработки техногенного сырья необходимо комплексно, учитывая его экологическую опасность и выгоды от рекультивации земель, а также восстановление среды обитания человека и животного мира. Следует отметить, что для действующих горнодобывающих предприятий переработка техногенного сырья является наиболее эффективным способом укрепления минерально-сырьевой базы и повышения эффективности ее эксплуатации, при этом снижая ресурсоемкость продукции и оказывая влияние на оздоровление окружающей среды.

В настоящий момент ужесточение экологических требований, а также ухудшение минерально-сырьевой базы Казахстана определяет необходимость проведения научно-исследовательских работ в данном направлении, так как это, в свою очередь, способствует вовлечению в процесс добычи ценных металлов бедного по составу техногенного сырья и дает возможность рационально использовать минеральные ресурсы, составляющих основу сырьевой базы страны [3]. Таким образом повышение извлечения благородных металлов из упорного техногенного сырья является актуальной задачей.

## 2. Методы и материалы

При выполнении исследований было использовано современное исследовательское и аналитическое оборудование: атомно-эмиссионный спектрометр Optima 2000 DV, рентгеновский дифрактометр D8 ADVANCE; ИК-Фурье спектрометр ThermoNicoletAvatar 370 FTIR Spectrometer; рентгенофлуоресцентный спектрометр Venus 200 PA Nalyical B.V. Химический состав лежалых хвостов опреде-

ляли масс-спектрометрическим методом на атомно-абсорбционном спектрометре AA240 «Varian» с индуктивно-связанной плазмой в соответствии с ГОСТ 27329-87. Электронную растровую микроскопию и рентгеноспектральный микроанализ осуществляли на электронном растровом микроскопе с электронно-зондовым микроанализатором JEOLJXA-8230. Минералогический анализ осуществлен на поляризационном микроскопе LEICADM 2500 P.

### 2.1. Экспериментальная часть

Рудоподготовка является начальным и важным этапом в технологии переработки золотосодержащего сырья и золотосодержащих техногенных отходов. Технологическое назначение операций рудоподготовки заключается в том, чтобы раскрыть минералы при минимально возможной крупности и минимальном переизмельчении (действовать по принципу «не дробить ничего лишнего»). Рудоподготовка включает операции грохочения, дробления, измельчения и классификации. В лабораторных исследованиях к вышеперечисленным операциям добавляется операция перемешивания, необходимая для получения представительной пробы исследуемого материала, что немаловажно, так как в рудном сырье золото распределено неравномерно.

Крупность зерен, до которой нужно дробить и измельчать исходный материал, определяется размером вкрапленности и принятой технологией в целом. Чем полнее раскрываются минералы при дроблении и измельчении, тем успешнее протекают последующие операции извлечения ценных компонентов.

При проведении исследований процессы отбора, опробования, обработки и подготовки проб, а также постановка и интерпретация проведенных опытов являются одними из важных моментов, от которых зависят дальнейшие результаты исследований. Подготовка представительной пробы техногенных золотосодержащих отходов – хвостов месторождения «Аксу» проводилось методом ручного опробования, который состоит из следующих этапов: отбор пробы, усреднение ее методом «кольца и конуса», квартование [4]. После усреднения и квартования пробы были отобраны частные пробы для химического, пробирного, рентгеноспектрального и минералогического анализов.

Проведение гранулометрического анализа является важнейшим видом исследования, так как гранулометрический состав является наиболее важным из признаков, определяющих все остальные особенности: минералогический состав, физические свойства, инженерно-геологические особенности и другие признаки.

Для изучения гранулометрического состава был проведен гранулометрический анализ, который включал следующие шаги: подготовка образца, процесс просеивания, взвешивание фракций. Для подготовки образца образец материала собирали и предварительно подготавливали с помощью очистки от загрязнений и раздробления материала до достаточно мелкой формы. Для проведения просеивания образец материала просеивали через серию сит с различными размерами отверстий. Сита разместили таким образом, чтобы сита с наименьшими отверстиями были на дне, а сита с наибольшими отверстиями - сверху. Затем образец помещали на верхнее сито и процеживали путем тряски или механического воздействия. Процесс просеивания продолжали до тех пор, пока весь материал не прошел через наимельчайшие отверстия. Далее провели взвешивание

вание фракций, который включал сбор образцов оставшихся на каждом сите материала после просеивания и их взвешивание. Полученные данные о массе каждой фракции использовались для вычисления процентного содержания материала в каждой размерной фракции.

Изучение гранулометрического состава породы производили путем разделения слагающих ее зерен на классы крупности и установления объема каждого класса. Объем отдельных классов выражали в процентах. Образцы для изучения гранулометрического состава исследуемых проб испытывали методом мокрого ситового анализа, пробы при этом отбирали с помощью точечного способа. Исследуемая проба в данном методе была отквартована в количестве 1 кг и рассеяна по фракциям.

Для определения содержания золота в пробах использовали пробирный и атомно-адсорбционный методы анализа. Пробирный и атомно-адсорбционный методы являются двумя распространенными методами анализа золота. Оба метода были использованы для определения содержания золота в образцах материалов. Для проведения пробирного метода было проведено химическое растворение золота в реагентах и его последующее количественное определение. Данный метод включает следующие процедуры: подготовку образцов, химическое растворение, отделение золота и определение содержания золота. Для подготовки образца образец, содержащий золото, обрабатывали для получения растворимой формы, включая различные методы обработки. При проведении химического растворения обработанный образец помещали в кислотный раствор, содержащий азотную и соляную кислоты для растворения золота. После растворения золота было проведено отделение от золота от других компонентов образца.

При использовании атомно-адсорбционного метода анализа проводили подготовку образца, содержащее золото для преобразования его в растворимую форму. Далее производили измерение содержания золота и других компонентов, при котором образец вводится в атомизер, а затем после пропускания световых волн через образец измеряется поглощение света элементами в атомном состоянии.

С помощью минералогического анализа золота был изучен минералогический состав образцов, содержащих золото. Данный анализ помог определить, какие минералы присутствуют вместе с золотом и в каких минеральных фазах оно находится. Минералогический анализ включает процедуру подготовки образца, при которой образец, содержащий золото, должен быть предварительно был подготовлен перед анализом. Далее с помощью оптического микроскопа провели визуальную оценку минералогического состава. Для определения кристаллической структуры минералов в образце использовали рентгеновскую дифрактометрию, а для определения морфологии, размера и распределения минералов, а также для выявления присутствия золота и его связей с другими минералами – методы электронной микроскопии – СЭМ и ТЭМ.

Рентгеноспектральный анализ золота позволил определить химический состав образцов и определить наличие и содержание золота. При этом было измерено характеристическое рентгеновское излучение, которое испускается золотом при облучении рентгеновскими лучами. Данный анализ включает в себя следующие процедуры: подготовка образца, облучение образца рентгеновскими лучами, регистрацию и анализ рентге-

новского излучения, и интерпретацию спектра, и определение содержания золота. Для подготовки образца образец золота обрабатывали и преобразовали в форму для проведения измерения. Далее проводили облучение образца рентгеновскими лучами, при котором образец помещали в рентгеновский спектрометр, который генерирует рентгеновские лучи. Рентгеновские лучи облучают образец, и атомы золота в образце в результате взаимодействия с рентгеновским излучением испускают рентгеновское излучение. Далее проводили регистрацию и анализ рентгеновского излучения: рентгеновское излучение, испускаемое образцом, регистрировали при помощи детектора в рентгеноспектрометре. По полученным рентгеновским спектрам, содержащим характеристические пики, соответствующие энергиям испускаемого излучения различных элементов, проводили интерпретацию спектров и определяли содержания золота.

### 3. Результаты и обсуждение

В данном разделе представлены результаты ситового анализа проб лежалых хвостов, химический состав исходной пробы, фазовый состав, результаты рентгенограммы, рационального (фазового) анализа, микрофотография и точечный ЭДС анализ частиц исходной пробы лежалых хвостов, полученная с помощью РЭМ-РСМА, результаты волно-дисперсионного анализа, фрагментов частиц образца и результаты элементного картирования зерен частиц исходных проб лежалых хвостов техногенных минеральных образований месторождения месторождения «Аксу», полученных с помощью ВДС.

Результаты ситового анализа проб техногенного золотосодержащего сырья – хвостов месторождения «Аксу», представлены в таблице 1.

**Таблица 1. Результаты ситового анализа проб лежалых хвостов**

| Классы крупности, мм | Сульфидная проба лежалых хвостов. Выход, % |
|----------------------|--|
| +0.1                 | 0.5  |
| -0.1+0.5             | 14.3                                       |
| -0.5+0.25            | 15.4                                       |
| -0.25+0.074          | 66   |
| -0.074+0             | 3.8  |
| Итого                | 100.00                                     |

Как видно из таблицы 1, в пробах выход класса в интервале  $-0.25+0.074$  мм значительный и составляет 66%. Содержание класса  $-0.074$  мм в пробах равна 3.8%. Наименьший выход класса  $+0.1$  составляет 0.5%.

Результаты ситового анализа лежалых хвостов свидетельствуют о том, что исходная проба, в основном, представлена классом  $-0.25+0.074$  мм.

Для выполнения пробирных, химических, рентгенофлуоресцентных, минералогических и рентгеноспектральных анализов отобраны частные пробы крупностью  $-2$  мм, которые были истерты до крупности 100% класса  $-0.074$  мм. Расчетное содержание золота в пробе по данным пробирного и атомно-адсорбционного метода анализа приведены в таблице 2.

По результатам пробирного и атомно-адсорбционного анализов, представленных в таблице 2 золото в техногенных минеральных образованиях, варьируется от 1.11 до 1.28 г/т.

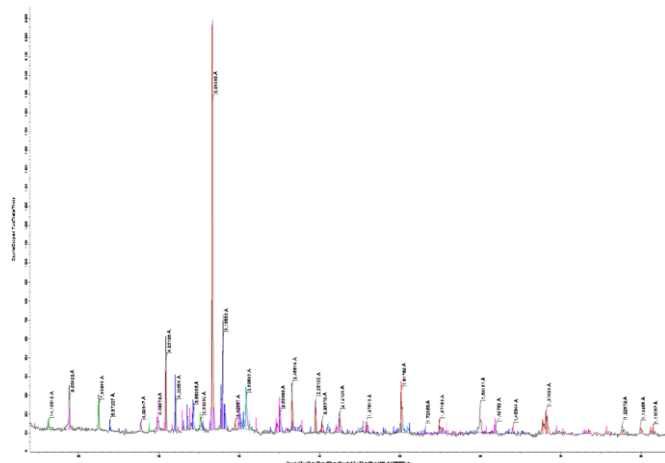
**Таблица 2. Химический состав исходной пробы техногенных отходов**

| Наименование анализа | Массовая доля определяемых элементов, г/т |       |
|----------------------|---|-------|
|                      | Au  | Ag    |
| Пробирный            | 1.11                                      | 18.02 |
| Атомно-адсорбционный | 1.28                                      | 16.15 |

Как известно, золото в техногенных отходах месторождения «Аксу» во многих случаях присутствует в тонкодисперсном виде, к которому принято относить зерна размером от долей микрометра до 10 мкм. В таких размерах золото может присутствовать в сульфидах, карбонатах, силикатах, оксидах и гидроксидах. В последнее время имеются научные работы [5], свидетельствующие о наличии тонкодисперсного золота в кварце, слоистых алюмосиликатах и органическом веществе, в которых оно распределено крайне неравномерно и присутствует в переменном количестве. Известно, что техногенные отходы - более сложное в технологическом отношении сырье. В связи с этим, для изучения минералогического состава были проведены рентгеноспектральные и минералогические исследования. Фазовый состав проб техногенных отходов исследуемых образцов был получен с помощью рентгенофазового анализа (таблица 3 и рисунок 1).

**Таблица 3. Фазовый состав техногенных отходов месторождения «Аксу»**

| Наименование  | Формула   | S-Q, % |
|---------------|---|--------|
| Quartz, syn   | SiO <sub>2</sub>  | 63.2   |
| Barite        | BaSO <sub>4</sub>   | 26.8   |
| Muscovite-2M1 | KAl <sub>2</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> | 6.3    |
| Gypsum        | Ca(SO <sub>4</sub> )(H <sub>2</sub> O) <sub>2</sub>                     | 3.8    |
| Итого         |   | 100.0  |



**Рисунок 1. Рентгенограмма техногенных минеральных образований месторождения «Аксу»**

Результаты рентгенофлуоресцентного анализа выявили наличие в пробах следующих элементов, (%): Ba - 17.7; Si - 12.6; S - 6.4; Fe - 5.4; Al - 3.6; Na - 0.4; Mg - 0.3; Zn - 0.2; Pb - 0.1; Cu - 0.1; As - 0.01. Исследования фазового состава хвостов показали, что в пробе основным минералом является α- кварц (SiO<sub>2</sub>) – 63%, доля барита (BaSO<sub>4</sub>)– 26.8%, мусковита (KAl<sub>2</sub>(Si,Al)4O10(OH)2) – 6.3% и гипса (Ca(SO<sub>4</sub>)(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>) - 3.8%. Согласно данным аналитических исследований было показано, что исследуемые образцы лежалых хвостов являются достаточно сложным объектом для извлечения золота, что связано с вышеописанными

особенностями вещественного состава. При этом золото представлено в виде тонких вкраплений в сульфиды, что определяет упорный характер исследуемого сырья. Для выяснения форм нахождения золота были выполнены фазовые (рациональные) анализы усредненных проб с исходной крупностью 0.074 мм, результаты которых приведены в таблице 4.

**Таблица 4. Результаты рационального (фазового) анализа золотосодержащих отходов**

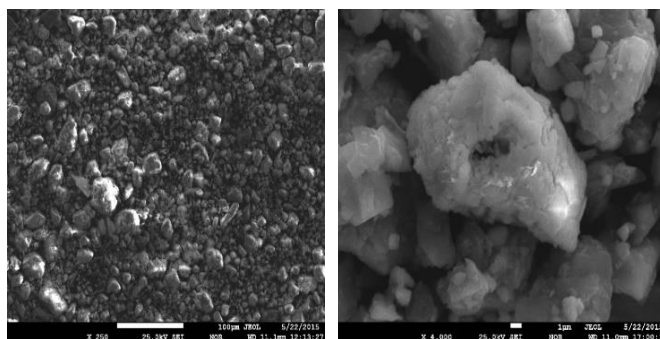
| Формы нахождения золота и характер его связи с рудными компонентами         | Распределение золота |      |
|---|----------------------|------|
|   | г/т                  | %    |
| Свободное и в виде сростков с рудными компонентами (цианируемое)            | 0.25                 | 7.18 |
| Покрытое кварцем, пленками гидроксидов железа, карбонатами, хлоритами и др. | 2.25                 | 64.7 |
| Ассоциированное золото с сульфидами   | -                    | -    |
| Тонко вкрапленное в породообразующие минералы                               | 0.68                 | 19.5 |
| Тонкодисперсное в породообразующие минералы                                 | 0.30                 | 8.62 |
| Итого в руде (по балансу)   | 3.48                 | 100  |

Из представленных результатов рационального анализа видно, что доля свободного в виде сростков с рудными компонентами золота в них составляет 7,18 %. Установлено, что основная часть золота - 64,7 % находится в сульфидной пробе в виде пленок, покрытых кварцем, гидроксидами железа, карбонатов, хлоритов и других минералов.

Для точной диагностики и подтверждения наличия золота и других сопутствующих металлов, а также для проведения элементного картирования зерен минералов проведено электронно-зондовое сканирование при больших увеличениях на электронном растровом микроскопе.

Результаты качественного и количественного анализа в произвольно выбранном участке микроскопических размеров во взаимосвязи с топографией поверхности топографических снимков с помощью растровой электронной микроскопии с специальным электронно-зондовым микроанализатором ("микрозонд") показаны на рисунках 1-2.

На рисунке 1 представлена микрофотография и точечный ЭДС-анализ частиц исходной пробы лежалых хвостов, полученная с помощью РЭМ-РСМА.



**Рисунок 1. Микрофотография и точечный ЭДС анализ частиц исходной пробы лежалых хвостов, полученная с помощью РЭМ-РСМА**

На рисунке 2 и таблице 5 представлен волнодисперсионный спектр фрагментов частиц образца исходной пробы лежалых хвостов и результаты элементного анализа.

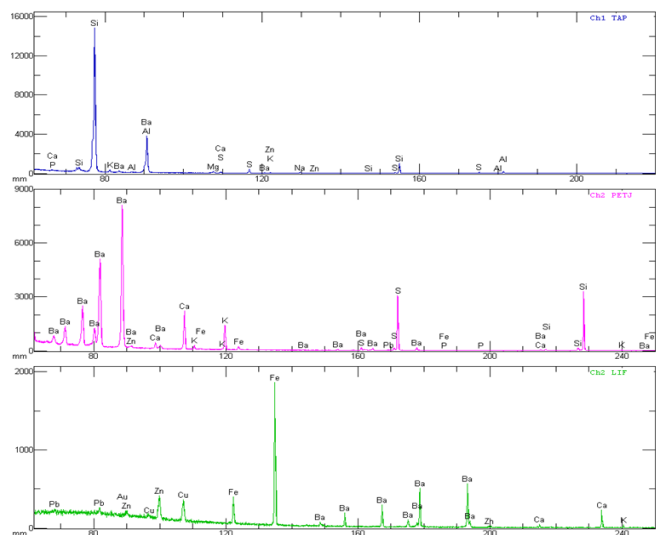


Рисунок 2. Волно-дисперсионные спектры фрагментов частиц образца

Далее представлены результаты элементного анализа, полученные с помощью волно-дисперсионный спектрометра (таблица 5).

Таблица 5. Результаты волно-дисперсионного анализа фрагментов частиц образца

| Element | Mass (%) | Atom (%) | K0)    |
|---------|----------|----------|--------|
| Na      | 0.990    | 1.8720   | 0.100  |
| Kg      | 0.613    | 1.0978   | 0.096  |
| Al      | 8.100    | 13.0610  | 1.594  |
| Si      | 25.195   | 39.0231  | 6.019  |
| P       | 0.174    | 0.2455   | 0.039  |
| S       | 14.487   | 19.6593  | 4.090  |
| K       | 2.813    | 3.1311   | 1.038  |
| Ca      | 3.528    | 3.8302   | 1.428  |
| Fe      | 7.845    | 6.1113   | 3.227  |
| Cu      | 0.899    | 0.6151   | 0.384  |
| Zn      | 0.986    | 0.6564   | 0.431  |
| Ba      | 32.547   | 10.3101  | 12.905 |
| Au      | 0.425    | 0.0939   | 0.161  |
| Pb      | 1.396    | 0.2932   | 0.521  |
| Итого   | 100.000  | 100.0000 | 32.034 |

На рисунках 1 и 2 видно, что в пробе присутствуют такие элементы как, железо, сера, золото, алюминий, кремний и барий.

Для представления сложной структуры исследуемых исходных проб лежалых хвостов было проведено элементное картирование зерен частиц (рисунок 3).

Согласно полученным данным элементного картирования зерен частиц исходных проб лежалых хвостов - проба не стойкая по структуре и при наведении электронных пучков происходит ее отслаивание. При этом можно сказать, что распределение элементов в сульфидных пробах неравномерное и в них в основном преобладают такие элементы, как Ba, S, что свидетельствует о содержании большого количества сульфидных минералов, в данном случае сульфида бария - BaSO<sub>4</sub>. Также в одной из проб была обнаружена локализация сразу двух элементов – Zn и Cu, что свидетельствует о присутствии в данной пробе природной латуни. В данной пробе присутствуют такие элементы, как Al и Si, что указывает на присутствие минерала - алюмосиликата и еще раз доказывает, что в ис-

следуемых объектах золото находится в виде мелких тонких частиц и оно присутствует в тонкодисперсном виде в комплексных ассоциациях с минералами.

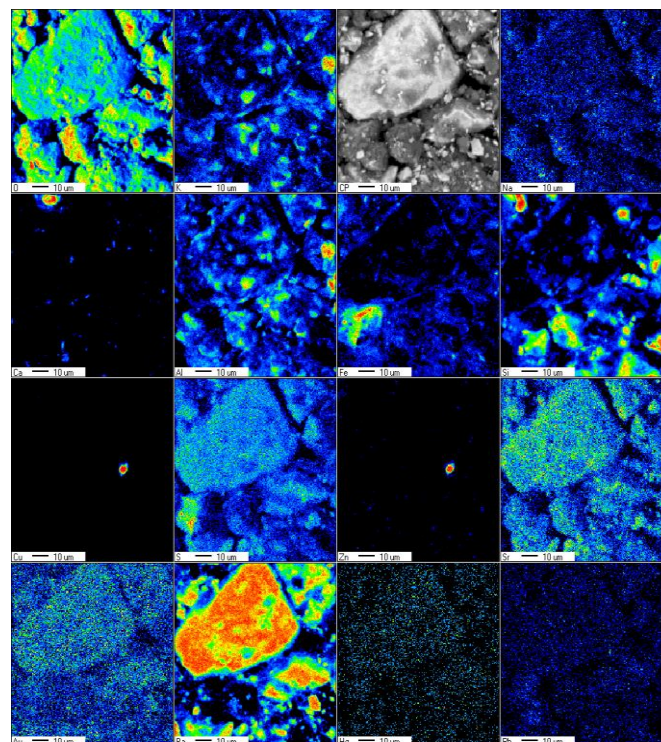


Рисунок 3. Элементное картирование зерен частиц исходных проб лежалых хвостов, полученных с помощью ВДС с увеличением x 750

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в техногенных отходах месторождения «Аксу» в основном концентрируются самые упорные формы золота.

#### 4. Выводы

В связи с особенностями вещественного состава и формой нахождения в нем золота золотосодержащих техногенных и вторичных отходов, важно применять для каждого типа такого сырья определенные подходы к извлечению благородных металлов. В работе проведено исследование гранулометрического состава, минералогический анализ для определения содержания золота в различных фазах и минералах техногенных золотосодержащих отходов месторождения «Аксу». При этом выявлено, что содержание золота в техногенных отходах варьируется от 1.11 до 1.28 г/т.

Согласно результатам рентгенофазового анализа техногенных минеральных образований фазовый состав в основном является α - кварц (SiO<sub>2</sub>) – 63%, барит (BaSO<sub>4</sub>)– 26.8%, мусковит (KAl<sub>2</sub>(Si,Al)4O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>) - 6.3% и гипс (Ca(SO<sub>4</sub>)(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>)- 3.8%. Рациональным анализом установлено, что в сульфидной пробе большая часть золота 64.7% находится в виде пленок, покрытых кварцем, гидроксидами железа, карбонатов, хлоритов и других минералов. Золото обнаружено в виде очень мелких зерен в сульфидах в виде пирита, а также в тонковкрапленном состоянии в силикатных минералах. Согласно данным аналитических исследований было показано, что исследуемые образцы лежалых хвостов являются достаточно сложным объектом для извлечения

золота, что связано с вышеописанными особенностями вещественного состава.

Данная статья имеет большое значение при разработке современных экономически и экологически целесообразных технологий переработки лежалых хвостов, так как повышенная активность пылеватой фракции отходов приводит к увеличению уровня экологического риска для прилегающих к хвостохранилищам территорий. Товарным продуктом, получаемым на начальной стадии переработки, может стать продуктивный золотосодержащий раствор, который можно подвергнуть осаждению с получением на выходе сплава Доре. Рассмотрение хвостохранилищ как техногенных месторождений с низким содержанием ценных компонентов приводит к необходимости разработки специфических технологий переработки, обеспечивающих не только получение ценного товарного продукта, но и снижающих ущерб окружающей среде.

## Литература / References

[1] Malikova, I.N., Anoshin, G.N. & Badmaeva, Zh.O. (2011). Mobile mercury species in soils of natural and natural-

technogenic landscapes. *Russian Geology and Geophysics*, 52(3), 320-332. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.02.005>

[2] Svetlana, Yu., Artamonova, A., Zhuravskaya, N. (2016). SR-XRFA in Biogeochemical Studies: Elemental Composition of Larch Tissues (*Larix cajanderi* Mayr.) of the Kuranakh Gold ore Field (Russia, Yakutia). *Physics Procedia*, (84), 288-294. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.11.049>

[3] Szamałek, K., Zglinicki, K., Mazurek, S., Szuflicki, M., I. de Séjournet de Rameignies, Tymiński, M. (2021). The role of mineral resources knowledge in the economic planning and development in Poland. *Resources Policy*, (74), 102354. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102354>

[4] GOST 14180-80. Metody otbora i podgotovki prob dlja himicheskogo analiza i opredelenija vlagi

[5] Zhi-Gao Wang, Jin Liu, Wen-Liang Xu, Hong-Yan Quan, Xiang-Jiang Yu. (2023). Geochronology (U-Pb and Re-Os) and HOS isotopes reveal ore fluid origin and crucial role of meteoric water for Laozuoshan quartz-vein-hosted gold metallogeny in Jiamusi, NE China. *Ore Geology Reviews*, (153), 105267. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105267>

## Ақсу кен орнының құрамында алтыны бар техногендік қалдықтарды физика-химиялық зерттеу

Н.К. Қазиева<sup>1</sup>, Н.В. Серая<sup>1</sup>, С.Б. Юлусов<sup>2</sup>, А.Т. Хабиев<sup>2</sup>, Е.С. Меркибаев<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Д. Серкибаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

<sup>2</sup>Satbayev University, Алматы, Қазақстан

\*Корреспонденция үшін автор: [y.merkibayev@satbayev.university](mailto:y.merkibayev@satbayev.university)

**Аңдатпа.** Құрамында алтыны бар техногендік қалдықтарды өңдеудің кешенді технологиясын әзірлеу үшін «Ақсу» кен орындарының техногендік минералдық түзілімдерінің өкілдік сынамаcы іріктелді. Орташа өкілдік сынама химиялық, рентгендік фазалық, минералогиялық, рентгендік спектрлік және электронды-микроскопиялық талдау әдістерін қолдану арқылы зерттелді. Мақалада «Ақсу» кен орнының құрамында алтыны бар Техногендік минералдық түзілімдердің физика-химиялық зерттеулері ұсынылған. Рентгендік фазалық талдау нәтижелері бойынша негізгі фазалық құрамдас бөліктер мынадай минералдар болып табылатыны анықталды:  $\alpha$ -кварц-63.2%, барит – 26.8%, мусковит – 6.3% және гипс-3.8%. Электронды зондты сканерлеу тау жыныстарын құрайтын минералдарға жұқа дақтар түрінде алтынның болуын анықтады. Рационалды талдаудың көмегімен олардағы алтынның кенді компоненттері бар өсінділер түріндегі бос үлестің 7.18% құрайтыны анықталды. Алтынның негізгі бөлігі – 64.7% кварцпен, темір гидроксидтерімен, карбонаттармен, хлориттермен және басқа минералдармен қапталған пленкалар түрінде сульфидті сынамада болатындығы анықталды. Техногендік минералдық түзілімдердегі сынамалық және атомдық-адсорбциялық алтын нәтижелері бойынша 1.11-ден 1.28 г/т-ға дейін ауытқиды. «Ақсу» кен орнының техногендік минералдық түзілімдерінің елеуіш талдауы бастапқы сынаманың негізінен  $-0.25+0.074$  мм сыныбымен ұсынылғанын көрсетті.

Аналитикалық зерттеулердің деректеріне сүйене отырып, ТМО-ның жатып қалған құйрықтарының зерттелетін үлгілері жоғарыда сипатталған заттық құрамның ерекшеліктерімен байланысты алтынды алу үшін жеткілікті күрделі объект болып табылады. Сондай-ақ алтынның сульфидтерге жұқа қосылуы зерттелетін шикізаттың табанды сипатын анықтайды.

«Ақсу» кен орнының техногендік минералдық түзілімдеріне алынған осы физика-химиялық зерттеулер осы шикізатты қайта өңдеу технологиясын таңдау үшін негіз болады.

**Негізгі сөздер:** техногендік қалдықтар, алтын, заттай құрамы, қалдық қоймалары, байыту қалдықтары.

## Физико-химические исследования техногенных золотосодержащих отходов месторождения Аксу

Н.К. Казиева<sup>1</sup>, Н.В. Серая<sup>1</sup>, С.Б. Юлусов<sup>2</sup>, А.Т. Хабиев<sup>2</sup>, Е.С. Меркибаев<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

<sup>2</sup>Satbayev University, Алматы, Казахстан

\*Автор для корреспонденции: [y.merkibayev@satbayev.university](mailto:y.merkibayev@satbayev.university)

**Аннотация.** Для разработки комплексной технологии переработки техногенных золотосодержащих отходов была отобрана представительная проба техногенных минеральных образований месторождений «Аксу». Усредненная представительная проба была изучена с использованием химического, рентгенофазового, минералогического, рентгено-спектрального и электронно-микроскопического методов анализов. В статье представлены физико-химические исследования золотосодержащих техногенных минеральных образований месторождения «Аксу». По результатам рентгенофазового анализа установлено, что основными фазовыми составляющими являются следующие минералы:  $\alpha$ -кварц - 63.2%, барит - 26.8%, мусковит - 6.3% и гипс - 3.8%. Электронно-зондовое сканирование выявило наличие золота в виде тонких вкраплений в породообразующие минералы. С помощью рационального анализа установлено, что доля свободного в виде сростков с рудными компонентами золота в них составляет 7.18%. Установлено, что основная часть золота - 64.7% находится в сульфидной пробе в виде пленок, покрытых кварцем, гидроксидами железа, карбонатов, хлоритов и других минералов. По результатам пробирного и атомно-адсорбционного золота в техногенных минеральных образованиях варьируется от 1.11 до 1.28 г/т. Ситовой анализ техногенных минеральных образований месторождения «Аксу», показал, что исходная проба, в основном, представлена классом  $-0.25+0.074$  мм.

Исходя из данных аналитических исследований видно, что исследуемые образцы лежалых хвостов ТМО являются достаточно сложным объектом для извлечения золота, что связано с вышеописанными особенностями вещественного состава. А также тонкая вкрапленность золота в сульфиды определяют упорный характер исследуемого сырья.

Полученные данные физико-химических исследований техногенных минеральных образований месторождения «Аксу» станут основой для выбора технологии переработки данного сырья.

**Ключевые слова:** техногенные отходы, золото, вещественный состав, хвостохранилища, хвосты обогащения.

Received: 05 February 2022

Accepted: 15 June 2023

Available online: 30 June 2023