

УДК 553.2:549:553.3(575.11)  
DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4292

## Вещественный состав медных шлаков Алмалыкского медеплавильного завода (Узбекистан)

С.С. Сайитов✉, В.Д. Цой, Ш.М. Расулов, Р.Д. Печерский,  
А.В. Расулова, А.К. Абдуваитов, А.А. Асроров

Государственное учреждение «Институт минеральных ресурсов», Узбекистан, г. Ташкент

✉sardorsayitov@gmail.com

**Аннотация. Актуальность.** Производство меди сопровождается выходом большого объема шлаков. В настоящее время по всему миру накопилось огромное количество медных шлаков, в составе которых содержание меди даже больше, чем в исходных рудах. Шлаки, которые образуются в результате плавки руд и концентратов как черных, так и цветных металлов, вместе с другими металлургическими отходами, такими как хвостохранилища, все чаще становятся предметом серьезных экологических споров. Единственным способом снижения негативного воздействия шлаковых отходов на окружающую среду может быть их утилизация путем комплексного извлечения ценных компонентов из них и дальнейшего использования шлаковых отходов для строительных целей. В медных шлаках кроме основного компонента меди присутствуют повышенные содержания золота, серебра, цинка, железа и др. Форма нахождения ценных металлов, таких как железо, медь, свинец и цинк, в медных шлаках сложная. Детальное изучение минерального состава шлаков используется при разработке эффективной технологии переработки шлаков. **Цель:** изучить минеральный состав медных шлаков, формы нахождения ценных компонентов. **Объект:** медные шлаковые отходы медеплавильного завода Алмалыкского ГМК. **Методы.** Химический состав медных шлаков установлен фазовым анализом, атомно-абсорбционным, рентгенофлуоресцентным методами исследований. Минеральный состав руд установлен в результате комплексных исследований, в том числе: оптической микроскопии в проходящем и отраженном свете, рентген-дифракционным, рентгеноспектральным локальным (микронзондовым) исследованием и электронной микроскопией. **Результаты.** Содержание меди в составе проб медных шлаков выше, чем в медных рудах, и составляет 0,77–0,97 %. Кроме меди в составе медных шлаков отмечаются повышенные содержания следующих металлов (г/т): Au – 0,17–0,26; Ag 8,42–10,64, Zn 4,288–10216, Pb – 2014–3360. В составе медных шлаков преобладают железистые силикаты (фаялит, ферросиллит), стекловидная масса железисто-силикатного состава. Рудные минералы представлены в основном магнетитом. Содержание минерала составляет примерно 10–15 %. Из минералов меди резко преобладают сульфиды – борнит, халькозин, реже кубанит, халькопирит, ковеллин. В незначительном количестве отмечаются куприт, самородная медь. Минеральная форма нахождения молибдена – молибденит. Из собственных минералов серебра установлено самородное серебро в ассоциации с минералами свинца. Золото входит в состав самородной меди и халькозина в виде примеси и переходит в медный концентрат при переработке шлаков.

**Ключевые слова:** медные шлаки, химический, минеральный состав, форма нахождения, медь, железо, золото, магнетит, сульфиды меди, Алмалыкский ГМК, Узбекистан

**Для цитирования:** Вещественный состав медных шлаков Алмалыкского медеплавильного завода (Узбекистан) / С.С. Сайитов, В.Д. Цой, Ш.М. Расулов, Р.Д. Печерский, А.В. Расулова, А.К. Абдуваитов, А.А. Асроров // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 4. – С. 148–158. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4292

---

UDC 553.2:549:553.3(575.11)  
DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4292

## Material composition of copper slag of the Almalyk copper-smelting plant (Uzbekistan)

S.S. Sayitov✉, V.D. Tsoi, Sh.M. Rasulov, R.D. Pechersky,  
A.V. Rasulova, A.K. Abduvaitov, A.A. Asrorov

*Institute of Mineral Resources, Tashkent, Uzbekistan*

✉sardorsayitov@gmail.com

**Abstract. Relevance.** Copper production is accompanied by release of a large volume of slag. Today, huge quantities of copper slags have accumulated all over the world, in which the copper content is even greater than that in original ores. The slags that result from the smelting of ores and concentrates of both ferrous and non-ferrous metals, together with other metallurgical wastes such as tailings, are increasingly the subject of significant environmental controversy. The only way to reduce the negative impact of slag waste on the environment can be their disposal, by complex extraction of valuable components from them and further use of slag waste for construction purposes. In addition to the main component of copper, copper slags contain elevated contents of gold, silver, zinc, iron, etc. The form of finding valuable metals such as iron, copper, lead and zinc in copper slags is complex. A detailed study of the mineral composition of slags is used in development of an effective technology for processing slags. **Aim.** To study mineral composition of copper slags, the form of finding valuable components. **Object.** Copper slag waste from the copper-smelting plant of the Almalyk MMC. **Methods.** Chemical composition of copper slags was established by phase analysis, atomic absorption, X-ray fluorescence research methods. Mineral composition of the ores was established as a result of complex studies, including: optical microscopy in transmitted and reflected light, X-ray diffraction, microprobe studies and electron microscopy. **Results.** Copper content in composition of copper slag samples is higher than in copper ores and it is 0.77–0.97%. In addition to copper, copper slags contain elevated contents of a complex of metals (g/t): Au – 0.17–0.26; Ag – 8.42–10.64, Zn – 4.288–10216, Pb – 2014–3360. Ferrous silicates (fayalite, ferrosillite), vitreous mass of ferruginous-silicate composition predominate in the composition of copper slags. Ore minerals are mainly represented by magnetite. The mineral content is approximately 10–15%. Among copper sulfides minerals bornite, chalcocite, less often cubanite, chalcopyrite, covellite sharply predominate. Cuprite is observed in small amounts, and native copper is metallic. The mineral form of finding molybdenum is molybdenite. Among the native silver minerals, native silver was found in association with lead minerals. Gold is included in the composition of native copper and chalcocite as an impurity and passes into copper concentrate during processing slags.

**Keywords:** copper slags, chemical, mineral composition, form of location, copper, iron, gold, magnetite, copper sulfides, Almalyk MMC, Uzbekistan

**For citation:** Sayitov S.S., Tsoi V.D., Rasulov Sh.M., Pechersky R.D., Rasulova A.V., Abduvaitov A.K., Asrorov A.A. Material composition of copper slag of the Almalyk copper-smelting plant (Uzbekistan). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 4, pp. 148–158. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4292

### Введение

**Актуальность.** Медь была первым металлом, который был выплавлен (извлечен из руды) около семи тысяч лет назад на древнем Ближнем Востоке, об этом свидетельствуют результаты исследований металлургических отходов, найденных во время археологических раскопок [1]. До сих пор медь является одним из востребованных металлов и спрос остается на высоком уровне.

Производство меди сопровождается выходом большого объема шлаков. Отвальные шлаки медного производства – это скопление минералов, в которых кроме меди содержатся и другие элементы, формирующие свойства шлаков [2]. Они содержат разное количество стекла и новых кристал-

лизованных фаз, а также могут содержать реликтовые минералы и флюсы. Состав шлаков зависит от металлургических процессов и состава перерабатываемой руды (руд) и используемых флюсов [3]. В основном медные шлаки представляют собой совокупность оксидов (железа, марганца и др.), оливина (фаялита и др.) и/или пироксенов [1].

Производство шлака составляет от 2 до 5 тонн на тонну черновой меди в медеплавильных предприятиях мира [4]. На сегодняшний день по всему миру накопились огромные количества медных шлаков, в составе которых содержание меди даже больше, чем в исходных рудах. Шлаки, которые образуются в результате плавки руд и концентратов как черных, так и цветных металлов, вместе с

другими металлургическими отходами, такими как хвостохранилища, все чаще становятся предметом серьезных экологических споров [5]. Металлы могут поступать в окружающую среду в условиях естественного атмосферного воздействия, загрязняя грунтовые и подземные воды.

Единственным способом снижения негативного воздействия шлаковых отходов на окружающую среду может быть их утилизация путем комплексного извлечения ценных компонентов из них и дальнейшего использования шлаковых отходов для строительных целей. В медных шлаках кроме основного компонента меди присутствуют повышенные содержания золота, серебра, цинка, железа и др. Например, в медном комплексе Сарчешмех Ирана скопилось около 8 млн т шлака со средним содержанием Cu – 1,67 %, Mo – 0,05 %, Ag – 40–56 г/т, Au – 1 г/т [6].

Форма нахождения ценных металлов, таких как железо, медь, свинец и цинк, в медных шлаках сложная [7]. Поэтому изучение минерального состава является актуальным, так как результаты минералогических исследований позволяют сделать выводы о их технологических свойствах и разработках технологических схем их обогащения и максимального извлечения ценных компонентов.

АО «Алмалыкский ГМК» является одним из крупных производителей меди в мире. При пирометаллургическом способе получения меди в плавильных печах медеплавильного завода (МПЗ) АО «Алмалыкский ГМК» образуется большое количество отвального шлака. Шлаки медного завода: шлак отражательной плавки (ОП) – 5439503 т; шлак кислородно-факельной плавки (КФП) – 1836117 т; шлак в плавке жидких ванн – 724380 т; всего 8000000 т [8].

Техногенное месторождение отвальных шлаков металлургического производства медеплавильного завода находится на расстоянии 3,7 км от города Алмалык. Начало формирования шлакоотвала 1964 г., и объект, действующий [8]. В отвальные хвосты АО «Алмалыкский ГМК» ежегодно поступает до 350–400 тыс. т отвальных шлаков КФП и ОП с содержанием железа 38–45 %, меди до 1 %, золота 0,4–0,6 г/т и других ценных компонентов [9]. Основными исходными материалами являются шлаки медеплавильного производства Алмалыкского ГМК, состоящие на 75 % из конверторных и на 25 % из отвальных шлаков и фторида аммония, который был применен в качестве фторирующего реагента [10].

Изучением минералого-технологических свойств медных шлаков Алмалыкского МПЗ занимались многие ученые [2, 8–22]. Установлено, что химический состав медных шлаков медеплавильных заводов СНГ имеет некоторое сходство [11]. В частно-

сти, медные шлаки имеют свою особенность, заключающуюся в том, что на 30–40 % шлак состоит из диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ) и примерно в таком же количестве содержатся оксиды железа [12]. В нем среднее содержание элементов и оксидов составляет: Cu – 0,06–0,9 %, Fe – до 50 %,  $\text{SiO}_2$  – 32 % и др. [8]. Результаты химического анализа двух проб шлаков АГМК, изученных М.Ш. Курбановым, также подтверждают, что основу медных шлаков Алмалыкского ГМК составляют  $\text{SiO}_2$  и оксиды железа, на их долю приходится более 80 % [10].

В составе шлака ценными компонентами являются Cu, Zn, Cd, Pb и благородные металлы Au, Ag [9, 13]. В составе отвального шлака содержатся следующие ценные компоненты: 0,7–1 % – Cu, 35–45 % – Fe, 0,2 г/т – Au, 0,4 г/т – Ag [14]. В составе конверторных шлаков АО «Алмалыкский ГМК» содержание меди составляет 2,4–3,56 %, общего железа до 49,5 % [15]. А.Х. Туресебеков установил повышенные содержания рения в составе медных шлаков медного производства Алмалыкской ГМК – 0,088 г/т [16].

По классификации В.В. Лапина, шлаки МПЗ АО «Алмалыкский ГМК» относятся к биминеральным и состоят из железистого ортосиликата – фаялита и магнетита [17]. Кроме того, в отвальном шлаке в значительных количествах присутствуют мелкие частицы сульфидов пирротин-халькопиритового, халькопирит-борнитового, халькозин-борнитового и халькозинового состава [12]. Оксиды металлов представлены купритом и гематитом; сульфиды – пирротин, халькозином, сфалеритом, галенитом, борнитом и нестехиометрическим соединением состава  $\text{CuFeS}$ ; самородные – серебром и медью [8].

В ближайшие годы планируется масштабное увеличение добычи меди. Было подписано постановление президента Республики Узбекистан № ПП-5159 «О дополнительных мерах по развитию горно-металлургической промышленности и смежных отраслей», в котором указано создание кластера медной промышленности и увеличение производства меди до 400 тыс. т в год. Соответственно это приведет к увеличению объемов медных шлаков. На сегодняшний день часть медных шлаков перерабатывается с первичными медными рудами, но в небольших количествах. Привлечение медных шлаков в переработку требует детальных минералогических и технологических исследований, чтобы максимально извлекать ценные компоненты из отходов.

Исследования, направленные на разработку технологии переработки медных шлаков, проводятся по всему миру давно. Из-за нехватки рудного концентрата различные горнодобывающие предприятия приступили к извлечению меди из отвального шлака. Типичный процесс состоит из дробления, измельчения и флотации [18]. Разработана

технология процесса магнитной сепарации прямым восстановлением на основе угля для извлечения железа из шлака с содержанием 39,85 % Fe<sub>общ</sub> и 0,33 % Cu. Результаты показывают, что конечный концентрат содержит 90,68 % железа, степень металлизации 94,01 %, 0,66 % Cu и 0,058 % S с общим извлечением железа 90,49 и меди 79,53 % [19].

Разработкой технологий переработки медных шлаков Алмалыкского ГМК также занимались многие исследователи. Было предложено использование аппаратов идеального перемешивания для переработки медных шлаков, так как оно даёт возможность наиболее эффективно провести процесс выделения меди, золота, серебра и других элементов из шлака; также сульфидизирование окисленных соединений полезных компонентов помогает эффективной переработке медных шлаков [20–22]. Н.М. Аскарова считает, что применение обескремнивания при переработке шлака позволяет извлекать медь в раствор гидрометаллургическим способом [14].

По мнению Ш.Т. Ходжиева и др. снижение содержания меди в шлаке до 0,12–0,17 % достигается продувкой бедной смеси и добавлением в шлак кварцевого песка (94 % SiO<sub>2</sub>). Добавление в шлак 10 % песка увеличивает содержание кремнезема в нем до 35 % и снижает содержание меди до 0,12 % [23].

Несмотря на многочисленные исследования, переработка шлаков медного производства остаётся одной из самых сложных и нерешенных проблем современной цветной металлургии. Детальное комплексное изучение минерального и элементного состава медных шлаков и формы нахождения ценных компонентов является важным для разработки оптимальной технологии переработки шлаков.

## Материал и методы

Были изучены три пробы медных шлаков, образованных на МПЗ АО «Алмалыкский ГМК» за последние 5–10 лет, 6 месяцев и за 2022 г. Химический состав представленных проб установлен фазовым анализом, атомно-абсорбционным (ZEEnit 700 P), рентгенофлуоресцентным (X50 Mobile Soil) методами исследований. Химико-аналитические исследования выполнены в Центре аналитических исследований ГУ «ИМР».

Изучение минерального состава представленных проб осуществлялось комплексом минералогических и прецизионных методов исследований. Были изготовлены шлифы и аншлифы и изучены в проходящем и отраженном свете под микроскопом Eclipse LV100 Pol (Nikon). При характеристике количественного минерального состава кроме оптических методов был применен рентгенофазовый анализ (дифрактометр ДРОН-3).

Для изучения формы нахождения золота и других сопутствующих элементов проводились анали-

тическая сканирующая электронная микроскопия с SEM EVO MA (10) Zeiss с рентгеновским детектором x-act (Oxford Instrument Nano Analysys), рентгеноспектральный локальный анализ Superprobe JXA-8800R (JEOL).

Аналитическая сканирующая электронная микроскопия (СЭМ-ЭДС) была проведена в Центре передовых технологий при Министерстве инновационного развития. Рентгеноспектральный локальный (микрозондовый) анализ проводился в Институте геологии и геофизики им. Х.М. Абдуллаева.

## Результаты и обсуждение

*Химический состав.* Содержания золота в пробах колеблются от 0,17 до 0,26 г/т, серебра – 8,42–10,64 г/т по данным атомно-абсорбционного анализа. Также установлены высокие содержания цинка, свинца, молибдена и меди. По данным фазового анализа содержание меди в изученных пробах колеблется от 0,77 до 0,97 %, медь представлена в основном сульфидной формой (табл. 1).

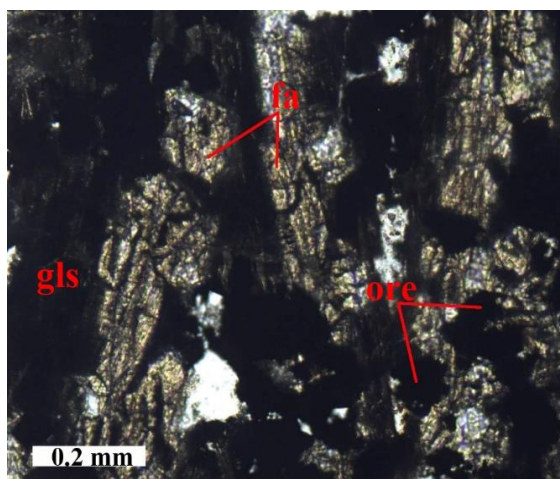
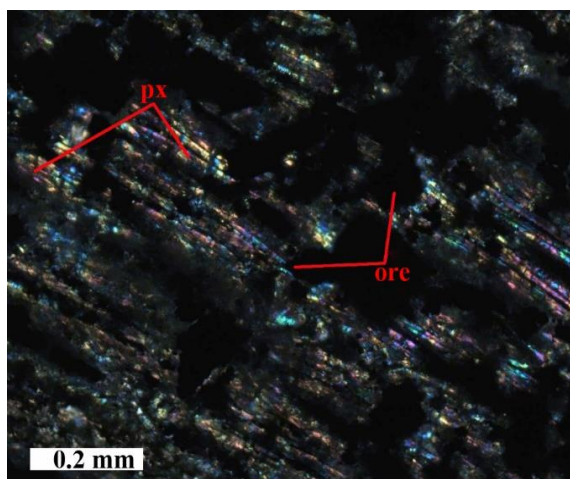
*Минеральный состав* изученных проб схож между собой. В результате просмотра прозрачных шлифов установлены следующие минералы: фаялит, ферросилит, кварц, серицит, стекло и рудные минералы. Фаялит и ферросилит являются основными минералами. Они развиты в виде удлинённо-призматических, лейстоватых и скелетовидных кристаллов, тесно срастающихся со стекловидной массой. Размеры зерен от 0,1–0,3 до 1–1,2 мм. Аморфный твердый силикатный раствор (стекло) выполняет пространство между кристаллами фаялита и ферросилита (рис. 1). Стекловидная масса состоит в основном из железа, кремния и кислорода. Полученные FTIR-спектры образцов медного шлака практически аналогичны спектру фаялитовой фазы [24]. Химический состав минералов, установленный рентгеноспектральным локальным анализом под микрозондом и аналитическим электронным микроскопом, также показывает, что нерудные минералы соответствуют в основном фаялиту.

Содержание рудных минералов составляет примерно 15–20 % от общего объема шлаковых образований. Нерудная масса представлена прорастаниями кристаллов фаялита и ферросилита со стеклообразной массой. В стеклообразной массе также выявлены тонкие ограненные и ксеноморфные зерна нерудных минералов. Фаялит и ферросилит развиты в основном в виде призматических и параллельно шестоватых, иногда разно ориентированных кристаллов. В результате их срастаний со стеклом происходит образование спутанно-волокнистой, фибролитовой, гипидиоморфнозернистой, скелетовидной и дендритовой структур. Кроме того, установлены изометричные, зернистые выделения фаялита и магнетита в стеклообразной массе.

**Таблица 1.** Содержание Au и Ag (г/т), сопутствующих элементов в шлаках разных лет хранения по данным атомно-абсорбционного и других методов анализа

**Table 1.** Content of Au and Ag (g/t), associated elements in slags of different years of storage according to atomic absorption and other methods of analysis

| № пробы<br>Sample no. | Период накопления шлака, год<br>Slag accumulation period, year | AAC, г/т<br>AAS, g/t |       | Химический анализ, %<br>Chemical analysis, % |      |       | РФА, г/т<br>XRF, g/t |       |       |       |       |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------|-------|----------------------------------------------|------|-------|----------------------|-------|-------|-------|-------|
|                       |                                                                | Au                   | Ag    | Fe                                           | Cu   | Mo    | Zn                   | Cu    | Pb    | Mo    | S     |
| 1                     | 1 год (за 2022 г.)/1 (for 2022)                                | 0,25                 | 10,64 | 27,54                                        | 0,97 | 0,215 | 7 683                | 6 171 | 3 071 | 2 199 | 7 481 |
| 2                     | 0,5 года/0.5                                                   | 0,26                 | 9,17  | 29,53                                        | 0,77 | 0,175 | 10216                | 6131  | 3360  | 1993  | 7256  |
| 3                     | 5–10 лет/5–10                                                  | 0,17                 | 8,42  | 32,42                                        | 0,92 | 0,065 | 4288                 | 6289  | 2014  | 680   | 7897  |



**Рис. 1.** Микрофотография медных шлаков в проходящем свете, николи скрещены. px – ферросиллит, fa – фаялит, gls – стекло, ore – рудные минералы

**Fig. 1.** Microphoto of copper slags in crossed polarized light. px – ferrosillite, fa – fayalite, gls – glass, ore – ore minerals

Рудные минералы представлены в основном магнетитом и сульфидами меди. Они равномерно распределены по площади шлака в виде отдельных вкраплений, тонких включений сульфидов меди в магнетите, скоплений и агрегативных сростков друг с другом. Структура выделений рудных минералов гипидиоморфно-, и неравномернoзернистая (рис. 2).

Из рудных минералов, по данным оптической микроскопии, установлены: магнетит, халькопирит, борнит, халькозин, ковеллин, медь самородная, галенит, сфалерит, блеклая руда, пирротин, пирит, молибденит. Среди них доминирует магнетит. В подчиненном количестве установлены халькопирит, борнит, пирротин и халькозин. Остальные отмечаются часто, но в единичных зернах. Форма сечения зерен рудных минералов в аншлифах кубическая, изометричная, сложно-угловатая, округлая, ксеноморфная. Их размеры от <0,01 до 0,2 мм. В основном рудные минералы рассредоточены в стеклообразной массе, между призматическими кристаллами фаялита и ферросиллита.

Содержания магнетита составляет примерно 10–15 %. В аншлифах форма сечения его зерен изометричная, октаэдрическая, кубическая. Размер зерен достигает 0,2 мм. Минерал равномерно рас-

пределен по площади шлака; наблюдается в виде тонких вкраплений, скоплений и в сростках с минералами меди. Иногда содержит включения халькопирита, халькозина, борнита и др.

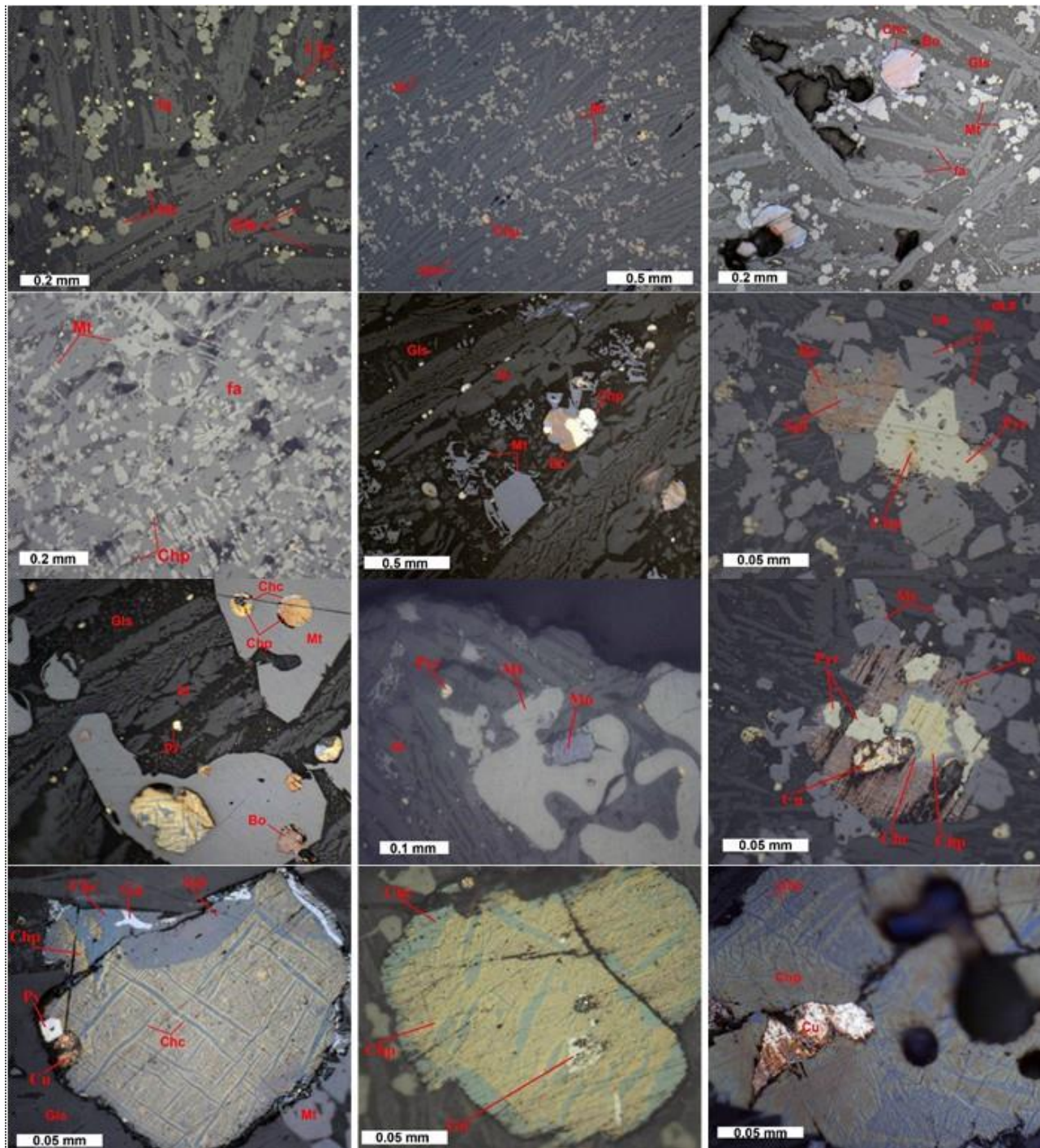
Минералы меди часто установлены в тесной ассоциации друг с другом, а также с пирротинoм, магнетитом, галенитом, сфалеритом. Представлены в основном халькопиритом, борнитом, халькозином. Они образуются в результате выделения растворенных сульфидов из шлака при его раскристаллизации. Во время расплавления шихты и штейно-шлакообразования состав сульфидной фазы (т. е. когда нерасплавленные сульфидные частицы шихты омываются шлаковой фазой) меняется от пирротин-халькопиритового и халькопирит-борнитового до халькозин-борнитового и халькозинового [12].

В отличие от исходных проб на поверхности борнита образуются тонкие решетчатые кристаллы халькозина. В составе исходных руд медная минерализация представлена в основном халькопиритом, редко вторичными сульфидами меди. Но они образуют тесные сростки друг с другом. Халькопирит отмечается в основном в ассоциации с пиритом, развиваясь по его краям, трещинам. Также установлено повышенное содержание золота до



6,11 % в составе вторичной самородной меди. В составе шлаков самородная медь развивается по трещинам, межзерновым пространствам новообразованных сульфидов меди.

Галенит и сфалерит встречаются по краям зерен минералов меди, т. е. согласно последовательности кристаллизации являются более поздними. Из минералов молибдена установлен молибденит (рис. 2).



**Рис. 2.** Характер выделений рудных минералов в шлаке. Фотография в отраженном свете. Fa – фаялит; Gls – стекло; Mt – магнетит; Chp – халькопирит; Chc – халькозин; Bo – борнит; Cu – самородная медь; Pyr – пирротин; Py – пирит; Spl – сфалерит; Gn – галенит, Mo – молибденит

**Fig. 2.** Character of allocation of ore minerals in slag. Photography in reflected light. Fa – fayalite; Gls – glass; Mt – magnetite; Chp – chalcopyrite; Chc – chalcocite; Bo – bornite; Cu – native copper; Pyr – pyrrhotite; Py – pyrite; Spl – sphalerite; Gn – galena, Mo – molybdenite

Минеральный состав шлаков установлен рентген-дифракционным методом. Съёмка проводилась на дифрактометре ДРОН-3 с CuK $\alpha$  с отфильтрованным излучением в режиме: I=25–30 mA, U=30 kV, V<sub>детект</sub>=2 °/мин, V<sub>дифр. ленты</sub>=600 мм/ч, предел измерений – 4×10<sup>2</sup> имп/с,  $\tau$ =0,5 с, щели: 1×2×0,25 мм. Интерпретация и идентификация минеральных фаз проводилась по стандартным методикам с использованием отечественных каталогов и ASTM.

Количественное содержание минеральных фаз рассчитывалось по методике РКФА (экспрессный рентгеновский количественный фазовый анализ), основанной на использовании уравнения Петера–Кальмана и унифицированных пересчетных корундовых коэффициентов без введения внутренних стандартов. Предполагается, что сумма всех кристаллических фаз составляет 100 %. Наличие рентгеноаморфного вещества в пробах не учитывалось. Содержание аморфного вещества в данных пробах высокое.

По данным рентген-дифрактометрического анализа в медных шлаках преобладают минералы группы пироксена и оливина, а также оксидов железа и магния. В составе пробы фаялит составляет 18,3–37,6 %, ферросиллит – 7,0–13,7 %, шпинель – 8,5–11,4 %. Кроме того, выявлены кальцит, доломит, хлорит, диопсид, графит в незначительных количествах. Из рудных минералов установлены пирротин (2,2–2,7 %), пирит, Cu-пирит (5,4–6,3 %), молибденит 0,8 %, самородная медь, железо. Минералы меди представлены также кубанитом, халькозином, ковеллином, халькопиритом и др.

Образование фаялитов и других сложных силикатов в составе медных шлаков других заводов отмечены многими исследователями. Но в зависимости от первоначального состава перерабатываемых руд и условий их переработки минеральный состав шлаков имеет некоторые различия. Например, в составе шлаков Балхашского медеплавильного завода выявлен фаялит магнезиальный: Mg<sub>0,26</sub>Fe<sub>1,74</sub>SiO<sub>4</sub>Mg<sub>0,347</sub>Fe<sub>1,548</sub>Mn<sub>0,105</sub>SiO<sub>4</sub> [25]. Фаялиты медных шлаков АГМК в подавляющем

большинстве случаев имеют избыточную против молекулы фаялита кремнекислоту, что вызвано тонким прорастанием скелетных кристаллов фаялита стеклом. Подобное явление В.В. Лапиным объясняется присутствием стекла внутри кристалликов фаялита в виде каплеобразных микровключений, образующихся за счет эмульсионной ликвации [12].

В составе шлаков в результате аналитической сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) определены следующие минералы меди: халькопирит, борнит, халькозин, ковеллин, кубанит, бурнонит, самородная медь, буланжерит, тетраэдрит. Также отмечаются различные соединения меди со свинцом, сурьмой. Кроме того, было доказано присутствие галенита, сурика, сфалерита, гудмундита, пирита, пирротина, самородного железа и др.

Рудные минералы установлены в виде вкрапленных, сложных сростков друг с другом, а также с магнетитом. Часто наблюдается развитие галенита по краям зерен минералов меди. Установлены сростки сфалерита с халькопиритом, борнитом, халькозином. Отмечены рудные минералы среди зерен фаялита в стеклообразной массе (рис. 3).

Для железа выявлены три основные фазы микронзондовыми исследованиями: первая фаза представлена кристаллами магнетита; вторая фаза – стеклообразной массой железисто-силикатного состава; третья фаза – кристаллами железистых сланцев (рис. 4). Также отметим, что железо входит в состав таких сульфидов, как пирротин, халькопирит, борнит, пирит и других сложных минеральных смесей.

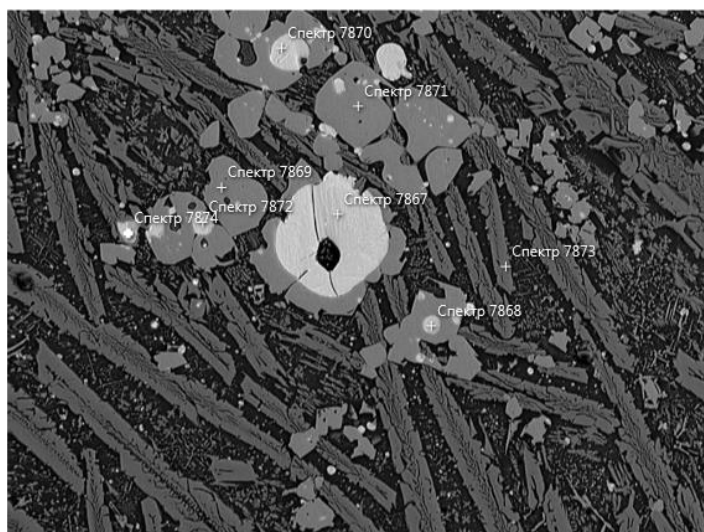
Медь в основном представлена халькопиритом, реже борнитом, халькозином. Халькозин часто встречается в виде игольчатых, удлинённых кристаллов на поверхности борнита. Установлены тетраэдрит и минерал, в составе которого медь, цинк и свинец. Выявлена примесь золота до 6,11 % в составе самородной меди (табл. 2). Медь самородная располагается в микротрещинах, на краях зерен борнита и халькозина. Иногда ассоциирует с минералами свинца.

**Таблица 2.** Элементный состав минералов меди и благородных металлов по результатам рентгеноспектрального локального анализа на микрозонде

**Table 2.** Elemental composition of copper minerals and precious metals based on the results of local X-ray spectral analysis on a microprobe

| Минерал/Mineral                                                | Элемент, мас. %/Element, wt % |      |       |       |       |      |      |      |       | Сумма<br>Total |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------|------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|----------------|
|                                                                | Cu                            | Fe   | Au    | Ag    | Pb    | Cr   | Ni   | Sb   | S     |                |
| Cu-3 самородная медь с золотом<br>Cu-3 native copper with gold | 89,68                         | 0,77 | 1,22  | 0,01* | 3,78  | –    | –    | –    | 0,09* | 95,45          |
|                                                                | 76,14                         | 1,04 | 5,76  | 0,06* | 13,51 | –    | –    | –    | 0,08* | 96,45          |
|                                                                | 95,25                         | 2,18 | 0,14* | 0,14* | –     | –    | –    | –    | 0,07* | 97,43          |
|                                                                | 91,59                         | 1,64 | 0,08* | 0,10* | –     | –    | –    | 3,41 | 0,10* | 96,64          |
|                                                                | 92,01                         | 2,09 | 0,20* | 0,08* | –     | –    | –    | 3,49 | 0,02* | 97,59          |
|                                                                | 83,16                         | 2,84 | 2,43  | 0,11* | 8,29  | –    | 0,74 | –    | 0,3   | 97,76          |
|                                                                | 83,32                         | 2,78 | 6,11  | 0,14* | 2,23  | 0,32 | 0,6  | –    | 0,14  | 95,50          |
|                                                                | 86,03                         | 2,84 | 5,32  | 0,08* | 1,45  | –    | 0,56 | –    | 0,07* | 96,20          |
|                                                                | 92,22                         | 2,81 | 0,07* | –     | –     | –    | 0,71 | –    | 0,05* | 95,74          |
| Ag самородное с галенитом<br>Ag native with galena             | 16,7                          | 1,48 | –     | 73,48 | 9,43  | –    | –    | –    | 0,36  | 101,45         |

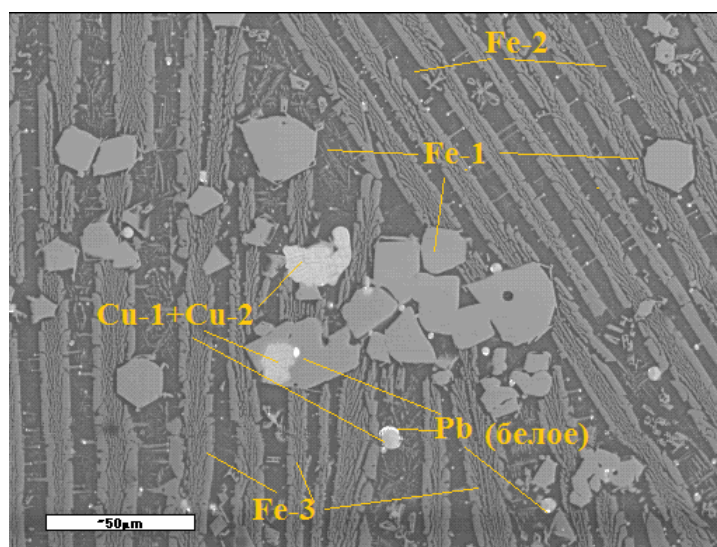




**Рис. 3.** Скопления рудных минералов. Фото в обратно-отраженных электронах под СЭМ. Элементный состав (%) в точке (№ спектра в таблице)

**Fig. 3.** Accumulations of ore minerals. Photo in backscattered electrons under SEM. Elemental composition (%) at a point (spectrum number in the table)

| № | № ЭДС спектра<br>EDS spectrum no. | Минерал/Mineral        | Fe    | Cu    | Al   | Ti   | Si | Mg   | O     | S     |
|---|-----------------------------------|------------------------|-------|-------|------|------|----|------|-------|-------|
| 1 | 7867                              | Борнит/Bornite         | 18,13 | 47,5  | –    | –    | –  | –    | –     | 34,38 |
| 2 | 7868                              | Борнит/Bornite         | 19,31 | 45,23 | –    | –    | –  | –    | –     | 35,46 |
| 3 | 7869                              | Магнетит/Magnetite     | 64,77 | –     | 4,66 | 0,99 | –  | –    | 29,58 | –     |
| 4 | 7870                              | Борнит/Bornite         | 19,55 | 47,12 | –    | –    | –  | –    | –     | 33,33 |
| 5 | 7871                              | Магнетит/Magnetite     | 64,13 | –     | 3,67 | 1,01 | –  | –    | 31,19 | –     |
| 6 | 7873                              | Ферросилит/Ferrosilite | 48,02 | –     | –    | –    | 17 | 2,08 | 32,91 | –     |
| 7 | 7874                              | Борнит/Bornite         | 16,88 | 50,1  | –    | –    | –  | –    | –     | 33,02 |



**Рис. 4.** Вкрапления магнетита, борнита и халькозина в шлаке с призматическими кристаллами фаялита. Фотография в обратно-отраженных электронах под микроскопом. Cu-1 – халькозин; Cu-2 – борнит; Cu-3 – самородная медь; Pb – свинец самородный

**Fig. 4.** Inclusions of magnetite, bornite and chalcocite in slag with prismatic fayalite crystals. Photography in backscattered electrons under a microprobe. Cu-1 – chalcocine; Cu-2 – bornite; Cu-3 – native copper; Pb – native lead

| Минерал/Mineral                                               | Элемент, мас. %/Element, wt % |      |      |      |     |      |     |      |      |      |      |      |      |      |      | Σ     |
|---------------------------------------------------------------|-------------------------------|------|------|------|-----|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
|                                                               | Fe                            | O    | Si   | S    | Al  | K    | Ca  | Ti   | Mn   | Cr   | Na   | Mg   | Zn   | V    | Ba   |       |
| Fe-1-кристаллы магнетита<br>Fe-1 magnetite crystals           | 65,9                          | 23,2 | 0,4  | –    | 2,8 | –    | –   | 1,24 | 0,09 | 0,05 | –    | 0,37 | 0,93 | –    | –    | 94,8  |
|                                                               | 66,3                          | 22,9 | 0,3  | –    | 2,6 | –    | –   | 1,07 | 0,0  | 0,26 | –    | 0,38 | 0,85 | –    | –    | 94,7  |
|                                                               | 64,5                          | 23,1 | 0,4  | 0,07 | 3,1 | –    | –   | 1,12 | 0,18 | 0,01 | –    | 0,41 | 1,08 | 0,04 | –    | 93,8  |
| Fe-2-железисто-кремнистое стекло<br>Fe-2-iron-siliceous glass | 14,8                          | 42,8 | 23,4 | 0,73 | 8,1 | 3,9  | 4,5 | 0,33 | 0,18 | –    | 0,55 | 0,37 | 1,3  | –    | –    | 101,0 |
|                                                               | 13,2                          | 43,3 | 25,1 | 0,49 | 7,6 | 4,8  | 3,7 | 0,14 | 0,14 | –    | 0,68 | 0,33 | 1,11 | –    | 0,03 | 100,8 |
|                                                               | 14,0                          | 42,9 | 23,7 | 0,58 | 8,5 | 4,8  | 3,9 | 0,22 | 0,14 | –    | 0,74 | 0,42 | 0,61 | –    | 0,23 | 99,8  |
| Fe-3-игольчатые (фаялит)<br>Fe-3-acicular (fayalite)          | 21,9                          | 39,2 | 20,1 | 0,87 | 5,7 | 3,9  | 6,1 | 0,13 | 0,09 | 0,02 | –    | 0,19 | 0,35 | –    | –    | 98,4  |
|                                                               | 47,6                          | 31,6 | 14,0 | 0,01 | 0,2 | 0,01 | 0,2 | –    | 0,51 | –    | –    | 1,72 | 1,22 | –    | –    | 97,1  |
|                                                               | 47,3                          | 31,6 | 14,0 | –    | 0,2 | 0,04 | 0,2 | –    | 0,49 | –    | –    | 1,96 | 1,24 | –    | –    | 96,9  |
|                                                               | 47,9                          | 31,5 | 13,9 | 0,04 | 0,3 | 0,1  | 0,3 | –    | 0,53 | –    | –    | 1,42 | 0,89 | –    | –    | 96,8  |



Из минералов серебра установлено самородное серебро размером вкраплений до 1 мкм. Встречается в сростании с галенитом, самородной медью. Серебро входит в состав самородного свинца до 16,88 %. Свинец представлен в основном галенитом, самородным свинцом, реже суриком. Он образует соединения с железом, медью, сурьмой. Цинк представлен сфалеритом и вюртцитом. Также в незначительном количестве входит в состав других минералов.

### Заключение

Был изучен вещественный состав медных шлаков комплексом аналитических методов. В медных шлаках кроме основного компонента меди присутствуют повышенные содержания золота, серебра, цинка, железа и др. Содержание меди в составе проб медных шлаков выше, чем в медных рудах, и составляет 0,77–0,97 %. Кроме меди в составе медных шлаков отмечаются повышенные содержания ряда металлов (г/т): Au – 0,17–0,26; Ag – 8,42–10,64; Zn – 4,29–10216; Pb – 2014–3360.

Форма нахождения ценных металлов, таких как железо, медь, свинец и цинк, в медных шлаках сложная, но в составе шлаков медеплавильного завода АГМК они представлены собственными минералами. Основная масса медных шлаков состоит из желези-

стых силикатов (фаялит, ферросиллит) и стекловидной массы железисто-силикатного состава.

Рудные минералы составляет 10–15 % и представлены в основном магнетитом и сульфидами меди, железа. Минералы меди очень тесно сростаются, замещают друг друга, а также образуют сростки с другими рудными минералами. Встречаются очень тонкие включения рудных минералов в виде взаимных прорастаний и в нерудной массе. Такие тесные сростки усложняют их процесс обогащения.

Результаты различных аналитических методов исследований подтверждают минеральную форму нахождения ценных компонентов. Высокие содержания ряда металлов и наличие их собственных минералов в составе шлаков увеличивают их ценность как техногенный источник меди, золота, серебра, молибдена, железа, свинца, цинка и др. Использование результатов данного минералогического исследования даёт возможность разработать технологические схемы обогащения и максимального извлечения ценных компонентов из шлаков. Переработка шлаковых отходов расширяет минерально-сырьевую базу Республики Узбекистан, а утилизация отходов является актуальной в решении экологических аспектов накопления шлаков.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bourgarit D. Mineralogy of slags: a key approach for our understanding of ancient copper smelting processes // *EMU Notes in Mineralogy*. – 2009. – Vol. 20. – Ch. 5. – P. 203–231.
2. Аскарлова Н.М. Некоторые минералогические свойства термически обработанного шлака АО «Алмалыкский ГМК» // *Universum: технические науки*. – 2021. – Т. 4 (85). DOI: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11572>.
3. Copper slag as a potential source of critical elements – a case study from Tsumeb, Namibia / S. Lohmeier, B.G. Lottermoser, T. Schirmer, D. Gallhofer // *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. – 2021. – Vol. 121. – P. 129–142. DOI: <http://dx.doi.org/10.17159/2411-9717/1383/2021>
4. Sanchez M., Sudbury M. Physicochemical characterization of copper slag and alternatives of friendly environmental management // *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*. – 2013. – Vol. 49 (2). – P. 161–168.
5. Enhancing the flotation recovery of copper minerals in smelter slags from Namibia prior to disposal / V. Sibanda, E. Sipunga, G. Danha, T.A. Mamvura // *Heliyon*. – 2020. – Vol. 6. – Iss. 1. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e03135>
6. Mineralogical properties of the copper slags from the SarCheshmeh Smelter Plant, Iran, in view of value recovery / M.N. Saeed, Sh.B. Behnam, Y. Mohamad Reza, M.M. Mohammad, K.Kh. Javad // *Minerals*. – 2022. – Vol. 12. – 1153. <https://doi.org/10.3390/min12091153>
7. Mineralogical characterization of copper slag from Tongling nonferrous metals group China / Ch. Tiejun, N. Chao, L. Hongming, L. Jiaxin, Y. Jialong // *JOM*. – 2016. – Vol. 68. – № 9. DOI: 10.1007/s11837-015-1752-6
8. Изучение химического вещественного состава шлаков медеплавильного производства, кеков, клинкеров и других отходов металлургических производств / К.Ж. Хакимов, А.С. Хасанов, О.А. Каюмов, А.Ю. Шукуров, Б.Ш. Соатов // *Universum: технические науки*. – 2021. – Т. 2 (83). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11313> (дата обращения: 10.06.2023).
9. Аскарлова Н.М., Самадов А.У. Возможности переработки шлаков медного производства гидрометаллургическим способом // *Вестник науки и образования*. – 2020. – № 10 (88). – Ч. 2. – С. 36–39.
10. Опытнo-промышленная установка для переработки шлаков медного производства Алмалыкского ГМК и свойства синтезированных порошков аморфного кремнезема / М.Ш. Курбанов, У.М. Нуралиев, Ж.А. Панжиев, С.А. Тулаганов, М. Эраназаров // *Uzbek Journal of Physics*. – 2022. – № 1. – С. 67–75. DOI: <https://doi.org/10.52304/v24i1.305>.
11. Сабанова М.Н. Интенсификация процесса флотации медного шлака в условиях водооборота: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2016. – 161 с.
12. Санакулов К.С., Хасанов А.С. Переработка шлаков медного производства. – Ташкент: Фан, 2007. – 238 с.
13. Цой В.Д., Королева И.В., Мулява Г.С. Минералого-геохимические особенности распределения меди и железа в концентратах и шлаках МПЗ АГМК // *Горный вестник Узбекистана*. – 2009. – № 3. – С. 24–30.
14. Аскарлова Н.М., Тошкодирова Р.Э. Результаты исследований переработки медного шлака и клинкера цинкового производства // *Universum: технические науки*. – 2022. – Т. 3 (96). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/13310> (дата обращения: 10.06.2023).

15. Depletion of slag from Almalyk Copper Plant with aluminum containing waste / Sh.T. Khojiev, A.A. Yusupkhodjaev, D.Y. Aribjonova, G.B. Beknazarova, D.N. Abdullaev // *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. – 2019. – Vol. 9. – Iss. 2. – P. 2831–2837. DOI: 10.35940/ijitee.B7200.129219.
16. Рений Узбекистана / А.Х. Турсебеков, Х.Т. Шарипов, И.Б. Турамурадов, А.Г. Лузановский, Б.Б. Василевский, Р.Р. Рахимов // *Горный вестник Узбекистана*. – 2007. – № 4. – С. 14–22.
17. Хасанов А.А. Изучение минерального состава шлаков МПЗ // *Горный вестник Узбекистана*. – 2007. – № 4. – С. 43–46.
18. Muhlare T.A., Groot D.R. Recovery of copper from reverberatory copper slag and production of a leach residue used as a portland cement additive // *Copper Cobalt Africa, incorporating the 8th Southern African Base Metals Conference*. – Livingstone, Zambia, 2015. – P. 247–255.
19. Utilization of waste copper slag to produce directly reduced iron for weathering resistant steel / X.L. Zhou, D.Q. Zhu, J. Pan, T.J. Wu // *ISI International*. – 2015. – Vol. 55. – № 7. – P. 1347–1352. DOI: <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.55.1347>
20. Technology of processing slags of copper production using local secondary technogenic formations / A.A. Yusupkhodjaev, Sh.T. Khojiev, B.T. Berdiyarov, D.O. Yavkochiva, J.B. Ismailov // *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. – 2019. – Vol. 9. – Iss. 1. – P. 5461–5472. DOI: 10.35940/ijitee.A4851.119119.
21. Переработка шлаков медного производства с использованием аппаратов идеального перемешивания / А.А. Юсупходжаев, А.С. Хасанов, С.Р. Худояров, Х.Р. Валев, С.Т. Маткаримов // *Горный Вестник Узбекистана*. – 2017. – № 4. – С. 67–71.
22. Эффективная технология переработки медных шлаков сульфидизированием её окисленных соединений / А.А. Юсупходжаев, А.С. Хасанов, С.Р. Худояров, Х.Р. Валев, С.Т. Маткаримов // *Горный Вестник Узбекистана*. – 2018. – № 1. – С. 42–47.
23. Khojiev Sh.T. Pyrometallurgical processing of copper slags into the metallurgical ladle // *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*. – 2019. – Vol. 6. – Iss. 2. – P. 8094–8099.
24. Mihailova I., Mehendjiev D. Characterization of fayalite from copper slags // *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*. – 2010. – Vol. 45.3. – P. 317–326.
25. Комплексная переработка конвертерных шлаков / Е.А. Ситько, Б.М. Сукуров, Г.С. Рузахунова, Б.А. Омирзаков, А.Е. Байдуисенова // *Комплексное использование минерального сырья, Казакстан*. – 2018. – № 2. – С. 45–56. URL: <https://doi.org/10.31643/2018/6445.6> (дата обращения: 10.06.2023).

#### Информация об авторах

**Сардор Савриддинович Сайитов**, PhD, начальник отдела минералогических исследований, Институт минеральных ресурсов, Узбекистан, 100164, г. Ташкент, ул. Олимлар, 64. [sardorsayitov@gmail.com](mailto:sardorsayitov@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0001-9984-8674>

**Владимир Денъевич Цой**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник, Государственное учреждение «Институт минеральных ресурсов», Узбекистан, 100164, г. Ташкент, ул. Олимлар, 64. [vtsoi@inbox.ru](mailto:vtsoi@inbox.ru)

**Шохрух Муйсун угли Расулов**, младший научный сотрудник, Институт минеральных ресурсов, Узбекистан, 100164, г. Ташкент, ул. Олимлар, 64. [shohruhrasulov2019@gmail.com](mailto:shohruhrasulov2019@gmail.com); <https://orcid.org/0009-0008-8066-4304>

**Руслан Дмитриевич Печерский**, младший научный сотрудник, Институт минеральных ресурсов, Узбекистан, 100164, г. Ташкент, ул. Олимлар, 64. [russell.4ay@gmail.com](mailto:russell.4ay@gmail.com)

**Алина Владимировна Расулова**, младший научный сотрудник, Институт минеральных ресурсов, Узбекистан, 100164, г. Ташкент, ул. Олимлар, 64. [alinasulova1986@gmail.com](mailto:alinasulova1986@gmail.com); <https://orcid.org/0009-0004-9790-8388>

**Азимжон Кудрат угли Абдуваитов**, геолог, Институт минеральных ресурсов, Узбекистан, 100164, г. Ташкент, ул. Олимлар, 64. [azimjon.abduvaitov96@gmail.com](mailto:azimjon.abduvaitov96@gmail.com); <https://orcid.org/0009-0007-5363-8656>

**Азамат Аскарали угли Асроров**, геолог, Институт минеральных ресурсов, Узбекистан, 100164, г. Ташкент, ул. Олимлар, 64. [asrorovazamat603@gmail.com](mailto:asrorovazamat603@gmail.com)

Поступила в редакцию: 15.06.2023

Поступила после рецензирования: 04.08.2023

Принята к публикации: 22.03.2024

#### REFERENCES

1. Bourgarit D. Mineralogy of slags: a key approach for our understanding of ancient copper smelting processes. *EMU Notes in Mineralogy*, 2009, vol. 20, Ch. 5, pp. 203–231.
2. Askarova N.M. Some mineralogical properties of thermally treated slag of Almalyk MMC JSC. *Universum: technical sciences*, 2021, vol. 4 (85). (In Russ.) Available at: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11572>.
3. Lohmeier S., Lottermoser B.G., Schirmer T., and Gallhofer D. Copper slag as a potential source of critical elements – a case study from Tsumeb, Namibia. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2021, Vol. 121, pp. 129–142. DOI: <http://dx.doi.org/10.17159/2411-9717/1383/2021>.
4. Sanchez M., Sudbury M. Physicochemical characterization of copper slag and alternatives of friendly environmental management. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, 2013, vol. 49 (2), pp. 161–168.
5. Sibanda V., Sipunga E., Danha G., Mamvura T.A. Enhancing the flotation recovery of copper minerals in smelter slags from Namibia prior to disposal. *Heliyon*, 2020, vol. 6, Iss. 1. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e03135>.

6. Saeed M.N., Behnam Sh.B., Mohamad Reza Y., Mohammad M.M., Javad K.Kh. Mineralogical Properties of the Copper Slags from the SarCheshmeh Smelter Plant, Iran, in View of Value Recovery. *Minerals*, 2022, vol. 12, 1153. DOI: <https://doi.org/10.3390/min12091153>.
7. Tiejun Ch., Chao N., Hongming L., Jiaxin L., Jialong Y. Mineralogical characterization of copper slag from tongling nonferrous metals group China. *JOM*, 2016, vol. 68, no. 9. DOI: [10.1007/s11837-015-1752-6](https://doi.org/10.1007/s11837-015-1752-6).
8. Khakimov K.Zh., Khasanov A.S., Kayumov O.A., Shukurov A.Yu., Soatov B.Sh. Study of the chemical composition of slags from copper smelting, cakes, clinkers and other wastes from metallurgical industries. *Universum: technical sciences*, 2021, vol. 2 (83). (In Russ.) Available at: <https://universum.com/ru/tech/archive/item/11313> (accessed 10 June 2023).
9. Askarova N.M., Samadov A.U. Possibilities of processing copper production slag by hydrometallurgical method. *Vestnik of science and education*, 2020, no. 10 (88), P. 2, pp. 36–39. (In Russ.)
10. Kurbanov M.Sh., Nuraliev U.M., Panzhiev Zh.A., Tulaganov S.A., Eranazarov M. Pilot plant for processing copper production slags of Almalyk MMC and properties of synthesized amorphous silica powders. *Uzbek Journal of Physics*, 2022, no. 1, pp. 67–75. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.52304/v24i1.305>.
11. Sabanova M.N. *Intensification of copper slag flotation under water circulation conditions*. Cand. Diss. Moscow, 2016. 161 p. (In Russ.)
12. Sanakulov K.S., Khasanov A.S. *Slag processing from copper production*. Tashkent, Fan Publ., 2007. 238 p. (In Russ.)
13. Tsoi V.D., Koroleva I.V., Mulyava G.S. Mineralogical and geochemical features of the distribution of copper and iron in concentrates and slags of the AGMK MPZ. *Gorniy Vestnik Uzbekistana*, 2009, no. 3, pp. 24–30. (In Russ.)
14. Askarova N.M., Toshkodirova R.E. Research results of copper slag processing and zinc production clinker. *Universum: technical sciences*, 2022, vol. 3 (96). (In Russ.) Available at: <https://universum.com/ru/tech/archive/item/13310> (accessed 10 June 2023).
15. Khojiev Sh.T., Yusupkhodjaev A.A., Aribjonova D.Y., Beknazarova G.B., Abdullaev D.N. Depletion of slag from Almalyk Copper Plant with aluminum containing waste. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 2019, vol. 9, Iss. 2, pp. 2831–2837. DOI: [10.35940/ijitee.B7200.129219](https://doi.org/10.35940/ijitee.B7200.129219).
16. Turesebekov A.Kh. Sharipov Kh.T., Turamuratov I.B., Luzanovsky A.G., Vasilevsky B.B., Rakhimov R.R. Rhenium of Uzbekistan. *Gorniy Vestnik Uzbekistana*, 2007, no. 4, pp. 14–22. (In Russ.)
17. Khasanov A.A. The study of the mineral composition of slags of the MPZ. *Gorniy Vestnik Uzbekistana*, 2007, no. 4, pp. 43–46. (In Russ.)
18. Muhlar T.A., Groot D.R. Recovery of copper from reverberatory copper slag and production of a leach residue used as a portland cement additive. *Copper Cobalt Africa, incorporating the 8th Southern African Base Metals Conference*. Livingstone, Zambia, 2015. pp. 247–255.
19. Zhou X.L., Zhu D.Q., Pan J., Wu T.J. Utilization of waste copper slag to produce directly reduced iron for weathering resistant steel. *ISIJ International*, 2015, vol. 55, no. 7, pp. 1347–1352. DOI: <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.55.1347>.
20. Yusupkhodjaev A.A., Khojiev Sh.T., Berdiyarov B.T., Yavkochiva D.O., Ismailov J.B. Technology of processing slags of copper production using local secondary technogenic formations. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 2019, vol. 9, Iss. 1, pp. 5461–5472. DOI: [10.35940/ijitee.A4851.119119](https://doi.org/10.35940/ijitee.A4851.119119).
21. Yusupkhodzhaev A.A., Khasanov A.S., Khudoyarov S.R., Valev Kh.R., Matkarimov S.T. Processing of copper production slags using perfect mixing devices. *Gorniy Vestnik Uzbekistana*, 2017, no. 4, pp. 67–71. (In Russ.)
22. Yusupkhodzhaev A.A., Khasanov A.S., Khudoyarov S.R., Valev Kh.R., Matkarimov S.T. Efficient technology of copper slag processing by sulfidization of its oxidized compounds. *Gorniy Vestnik Uzbekistana*, 2018, no. 1, pp. 42–47. (In Russ.)
23. Khojiev Sh.T. Pyrometallurgical processing of copper slags into the metallurgical ladle. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*, 2019, vol. 6, Iss. 2, pp. 8094–8099.
24. Mihailova I., Mehendjiev D. Characterization of fayalite from copper slags. *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*, 2010, vol. 45.3, pp. 317–326.
25. Sitko E.A., Sukurov B.M., Ruzakhunova G.S., Omirzakov B.A., Baiduisenova A.E. Complex processing of converter slags. *Integrated use of mineral raw materials, Kazakhstan*, 2018, no. 2, pp. 45–56. (In Russ.) Available at: <https://doi.org/10.31643/2018/6445.6> (accessed 10 June 2023).

#### Information about the authors

**Sardor S. Sayitov**, PhD, Head of the Mineralogical Research Department, Institute of Mineral Resources, 64, Olimlar street, Tashkent, 100164, Uzbekistan. [sardorsayitov@gmail.com](mailto:sardorsayitov@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0001-9984-8674>

**Vladimir D. Tsoi**, Dr. Sc., Professor, Chief Researcher, Institute of Mineral Resources, 64, Olimlar street, Tashkent, 100164, Uzbekistan. [vtsoi@inbox.ru](mailto:vtsoi@inbox.ru)

**Shohruh M. ugli Rasulov**, Junior Researcher, Institute of Mineral Resources, 64, Olimlar street, Tashkent, 100164, Uzbekistan. [shohruhrasulov2019@gmail.com](mailto:shohruhrasulov2019@gmail.com); <https://orcid.org/0009-0008-8066-4304>

**Ruslan D. Pechersky**, Junior Researcher, Institute of Mineral Resources, 64, Olimlar street, Tashkent, 100164, Uzbekistan. [russell.4ay@gmail.com](mailto:russell.4ay@gmail.com)

**Alina V. Rasulova**, Junior Researcher, Institute of Mineral Resources, 64, Olimlar street, Tashkent, 100164, Uzbekistan. [alinarasulova1986@gmail.com](mailto:alinarasulova1986@gmail.com); <https://orcid.org/0009-0004-9790-8388>

**Azimjon K. ugli Abduvaitov**, Geologist, Institute of Mineral Resources, 64, Olimlar street, Tashkent, 100164, Uzbekistan. [azimjon.abduvaitov96@gmail.com](mailto:azimjon.abduvaitov96@gmail.com); <https://orcid.org/0009-0007-5363-8656>

**Azamat A. ugli Asrorov**, Geologist, Institute of Mineral Resources, 64, Olimlar street, Tashkent, 100164, Uzbekistan. [asrorovazamat603@gmail.com](mailto:asrorovazamat603@gmail.com)

Received: 15.06.2023

Revised: 04.08.2023

Accepted: 22.03.2024