

Код МРНТИ 52.45.19

\*Е.М. Карманов, М.Б. Барменшинова, Р.В. Шарипов

Казахский национальный исследовательский университет имени К.И. Сатпаева (г. Алматы, Казахстан)

## К ВОПРОСУ КОМПЛЕКСНОГО ИЗУЧЕНИЯ ЭЛЕМЕНТНОГО И ФАЗОВОГО СОСТАВА МЕДНОГО ФЛОТАЦИОННОГО КОНЦЕНТРАТА

**Аннотация.** Представлены результаты комплексного исследования элементного и фазового состава медного флотационного концентрата ТОО «Кызылту» (Акмолинская область, Казахстан). Применялись рентгенофлуоресцентный и рентгенодифракционный анализ, микроскопия и химический анализ. Основными элементами концентрата выявлены *Cu, Fe, O, Si* и *S*, с примесями *Al, K, Mg, Ca* и *As*. Медь в концентрате представлена преимущественно сульфидными соединениями: халькопиритом (42,7%), борнитом (23,7%), сульфидом меди *Cu<sub>2</sub>S* (7,6%) и сфалеритом (6,3%), а также вторичными минералами богмитом (2,7%) и алюминий-гидроксид силикатом (2,0%). Показаны распределение меди между сульфидными и окисленными формами и особенности совмещения минералов, что обосновывает дальнейшие направления исследования некондиционного концентрата.

**Ключевые слова:** медный концентрат, минералогический анализ, фазовый состав, элементный состав, сульфиды, окисленные минералы, переработка.

### Мыс флотациялық концентратының элементтік және фазалық құрамын зерттеудің өзекті мәселелері

**Аннотация.** «Кызылту» ЖШС (Ақмола облысы, Қазақстан) флотациялық мыс концентратының элементтік және фазалық құрамын зерттеудің нәтижелері ұсынылған. Зерттеуде рентгенофлуоресценттік және рентгенодифракциялық талдау, микроскопия және химиялық талдау әдістері қолданылған. Концентраттың негізгі элементтері ретінде *Cu, Fe, O, Si* және *S* анықталды, қоспа ретінде *Al, K, Mg, Ca* және *As* бар. Мыс концентратта негізінен сульфидтік қосылыстар түрінде кездеседі: халькопирит (42,7%), борнит (23,7%), мыс сульфиді *Cu<sub>2</sub>S* (7,6%) және сфалерит (6,3%), сондай-ақ екінші реттік минералдар – богмит (2,7%) және алюминий-гидроксид силикат (2,0%). Мыс элементінің сульфидтік және оксидтік формаларға бөлінуі мен минералдардың өзара орналасу ерекшеліктері көрсетіліп, некондициялық концентратты әрі қарай зерттеудің бағыттары негізделген.

**Түйінді сөздер:** мыс концентраты, минералогиялық талдау, фазалық құрам, элементтік құрам, сульфидтер, тотыққан минералдар, қайта өңдеу.

### To the question of comprehensive study of the elemental and phase composition of copper flotation concentrate

**Abstract.** The results of a comprehensive study of the elemental and phase composition of copper flotation concentrate from «Kyzyltu» LLC (Akmola Region, Kazakhstan) are presented. X-ray fluorescence and X-ray diffraction analysis, microscopy, and chemical analysis were used. The main elements of the concentrate were *Cu, Fe, O, Si*, and *S*, with minor amounts of *Al, K, Mg, Ca*, and *As*. Copper in the concentrate is represented primarily by sulfide compounds: chalcopyrite (42,7%), bornite (23,7%), copper sulfide *Cu<sub>2</sub>S* (7,6%), and sphalerite (6,3%), as well as the secondary minerals bogmite (2,7%) and aluminum hydroxide silicate (2,0%). The distribution of copper between sulfide and oxidized forms and the specific features of mineral compatibility are demonstrated, which substantiates further directions for studying the substandard concentrate.

**Key words:** copper concentrate, mineralogical analysis, phase composition, elemental composition, sulfides, oxidized minerals, processing.

### Введение

Комплексная переработка медных месторождений является важнейшим аспектом современной горнодобывающей промышленности, сочетая различные методы для повышения эффективности и устойчивости. Этот процесс обычно включает в себя измельчение-флотацию, кучное выщелачивание, экстракцию растворителем – электролитическое извлечение (HBL-SX-EW) и осаждение меди. Используя эти методы, горнодобывающие компании могут оптимизировать извлечение ресурсов, минимизируя воздействие на окружающую среду. Последние достижения в технологиях переработки меди обещают значительное повышение эффективности: прогнозируется повышение эффективности до 30% по сравнению с традиционными методами [1]. Более того, внедрение передовых технологий в добычу меди отражает совместные усилия ученых металлургов и горнорудных компаний, что вносит вклад в достижение более широких целей устойчивого развития.

Мировое потребление меди непрерывно росло в течение последнего десятилетия. Однако ресурсы высококачественной меди истощаются и для удовлетворения спроса крайне важно разрабатывать ресурсы низкосортной и комплексной меди, а также некондиционных флотационных медных концентратов. Содержание меди на рудниках Казахстана варьируется от 0,5% до 6%, но в среднем составляют около 1%<sup>1</sup>, поэтому все более важным становится использование некондиционных ресурсов меди.

Сульфидные медные руды перерабатываются, главным образом, с помощью пирометаллургических технологий.

Технологические схемы переработки сульфидных руд включают стадию флотационного обогащения для получения концентратов и переработку концентратов с помощью обжига, плавки и конвертирования [2]. В настоящий момент металлургия Казахстана сталкивается с проблемой снижения содержания цветных металлов, в том числе меди в руде и исчерпания богатых легкообогащаемых руд, что вынуждает вовлекать в переработку руды, непригодные для получения кондиционных концентратов, что приводит к повышению удельных затрат на производство металлов [3]. Таким образом, получение кондиционных концентратов из руд многих медных и медно-молибденовых месторождений становится все более трудной задачей из-за исчерпания легкообогащаемого сырья, что вынуждает разрабатывать новые технологические подходы, позволяющие решить эти проблемы.

Известно, что гидрOMETаллургические технологии могут быть перспективными для переработки некондиционного минерального сырья. Было показано, что автоклавное выщелачивание может позволить удалить нежелательные компоненты из медного концентрата путем селективного выщелачивания или осаждения и таким образом, получить кондиционный медный концентрат [4]. Процесс гидрOMETаллургической оценки некондиционных флотоконцентратов месторождения «Кызылту» на предмет меди, молибдена и железа, который включает в себя определение элементного и фазового состава в образцах флотоконцентрата, имеет решающее значение. Поиск целевых компонентов в образцах требует различных аналитических под-

<sup>1</sup>МИА «Казинформ»: сайт. Аверченко Д. Жезказган – сердце медной индустрии Казахстана: как идет добыча металла. URL: <https://www.inform.kz/preview/2f13d3a2-6a1b-498e-9f0d-146ed6f13db2?ysclid=mkcfu0in5y816560600> (дата обращения: 06.09.2025).

ходов, поэтому аналитическая лаборатория должна быть в курсе поиска и качества передаваемых образцов [5].

Используя аналитические методы, исследователи могут точно определить элементную химию этих образцов. Геохимические методы должны быть способны работать с широким диапазоном концентраций элементов в широком диапазоне образцов материалов с различными и сложными матрицами [6]. Такой подход обеспечивает точные данные, необходимые для оценки экономического потенциала некондиционных флотоконцентратов.

Наше исследование подчеркивает значение комплексного подхода, который интегрирует геологический и геохимический анализы [7]. Понимая элементный и фазовый состав, руководство горнорудной компании сможет принять обоснованное решение относительно дальнейшей разработки и управления ресурсами, что, в итоге, будет способствовать устойчивым методам добычи. В этой работе описаны несколько физико-химических методов анализа ряда проб, молибденово-медного флотоконцентрата, полученного в процессе обогащения молибденово-медных руд месторождения «Кызылту».

#### Экспериментальная часть

**Определение элементного состава с использованием энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного (EDXRF) спектрометра Rigaku NEX CG II**

Для проведения исследований был отобран образец медного флотационного концентрата «КМФ 25-58» массой 500 г (рис. 1).

Элементный состав концентрата проведен в таблице 1. Анализы элементного состава образцов выполняли с использованием энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного (EDXRF) спектрометра Rigaku NEX CG II, который представлен на рис. 2.



**Рис. 1. Внешний вид исследуемого флотоконцентрата. Сурет 1. Зерттелетін флотациялық концентраттың сыртқы көрінісі.**

**Figure 1. Appearance of the studied flotation concentrate.**



**Рис. 2. Спектрометр Rigaku NEX CG II.**

**Сурет 2. Rigaku NEX CG II спектрометрі.**

**Figure 2. Rigaku NEX CG II – energy-dispersive X-ray fluorescence (EDXRF) spectrometer.**

Электронные изображения получены в сигнале детектора отраженных электронов. Идентификация пиков спектра, расширенный качественный и количественный анализ основан на программном обеспечении Rigaku RPF-SQX

**Таблица 1**

**Элементный состав флотоконцентрата «КМФ 25 – 58»**

**Кесте 1**

**«КМФ 25 – 58» флотациялық концентраттың элементтік құрамы**

**Table 1**

**Elemental composition of the flotation concentrate KMF 25 – 58**

Элемент	Содержание, %	Элемент	Содержание, %
<i>Cu</i>	33,0000	<i>Ba</i>	0,0806
<i>S</i>	19,2000	<i>Bi</i>	0,0780
<i>SiO<sub>2</sub></i>	18,2000	<i>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></i>	0,0725
<i>Fe</i>	13,3000	<i>Sb</i>	0,0636
<i>Zn</i>	3,4000	<i>Ag</i>	0,0537
<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	5,8400	<i>Co</i>	0,0479
<i>CaO</i>	1,7900	<i>Sn</i>	0,0297
<i>K</i>	1,3400	<i>Sr</i>	0,0200
<i>Mo</i>	1,2600	<i>Se</i>	0,0185
<i>As</i>	0,1900	<i>Te</i>	0,0166
<i>Pb</i>	0,1830	<i>Rb</i>	0,0118
<i>MnO</i>	0,1210	<i>Au</i>	0,0023

Fundamental Parameters (FP), использующем технологию Rigaku Profile Fitting (RPF) и Scattering FP. Это надежное интегрированное программное обеспечение позволяет проводить полуколичественный анализ практически всех типов образцов без стандартов, а также строгий количественный анализ со стандартами.

На рис. 3 представлены идентифицированные пики спектра, полученного при анализе образца пробы «КМФ 25 – 58». Согласно представленным спектральным линиям видно, что медь, кислород, железо, кремний, сера и небольшое количество алюминия, молибдена, цинка золота и серебра являются основными составляющими образца. Перед энергодисперсионным рентгенофлуоресцентным (EDXRF), рентгенодифракционным (XRD) и микроскопическим анализами навеску концентрата промывали горячим раствором 30% изопропилового спирта для удаления флотореагентов и масел и сушили при температуре 120 °C в течение 2 часов. Осушенный концентрат имел гранулометрический состав с размерами зерен в основном от 45 до 75 мкм.

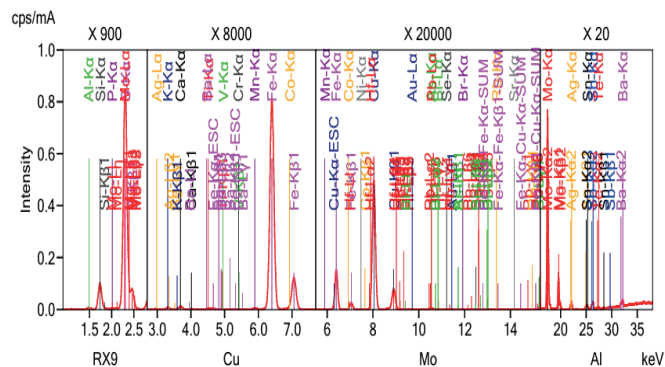


Рис. 3. Спектр флотоконцентрата «КМФ 25 – 58». Сурет 3. «КМФ 25 – 58» флотациялық концентраттың спектрі.

Figure 3. Spectrum of the flotation concentrate KMF 25 – 58.

*Определение фазового состава с использованием рентгенодифракционным (XRD) спектрометром Bruker D8 Advance*

Bruker D8 Advance – высокотехнологичный рентгенодифрактометр, используемый для определения фазового состава, кристаллической структуры, размеров и степени кристалличности материалов с встроенной программой идентификации фаз, представлен на рис. 4.

Из приведенного на рис. 5 рентгенодифракционного спектра также видно, что главной сульфидной фазой концентрата является халькопирит ( $CuFeS_2$ ), четко выделившийся из остальных фаз по своим характерным дифракционным отражениям с межплоскостными расстояниями  $d\alpha = 0,3020$  нм; 0,1868 нм; 0,1850 нм; 0,1827 нм; 0,1574 нм; 0,1341 нм и 0,1590 нм. Вторая по количеству фаза – борнит ( $Cu_3FeS_4$ ) представлена линиями с  $d = 0,1933$  нм; 0,2695 нм. Затем следуют кварц ( $SiO_2$ ) ( $d\alpha = 0,3340$  нм; 0,3106 нм), доломит –  $Ca(Mg,Fe)(CO_3)_2$  ( $d\alpha = 0,303$  нм), сульфид меди –  $Cu_2S$  ( $d\alpha = 0,3406$  нм; 0,2955 нм; 0,2092 нм), богмит –  $AlO(OH)$  ( $d\alpha = 0,2955$  нм; 0,2092 нм)

и алюминий гидроксид силикат –  $Al_6Si_4O_{14}(OH)_6$  с комплексами дифракционных отражений ( $d\alpha = 0,3406$  нм; 0,2049 нм; 0,1626 нм; 0,1238 нм).



Рис. 4. Рентгеновский дифрактометр Bruker D8 Advance.

Сурет 4. Bruker D8 Advance рентгендік дифрактометрі.

Figure 4. Bruker D8 Advance X-ray diffractometer.

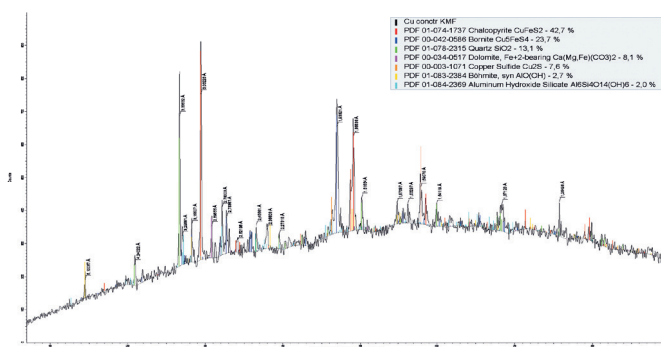


Рис. 5. Фазовый анализ флотоконцентрата «КМФ 25 – 58».

Сурет 5. «КМФ 25 – 58» флотациялық концентрат фазалық талдауы.

Figure 5. Phase analysis of the flotation concentrate KMF 25 – 58.

*Минералогическое исследование образцов на микроскопе Leica DM 2500 P*

Минералогическое изучение образцов проводилось в прямом отраженном свете на поляризационном микроскопе

пе Leica DM 2500 P, который представлен на рис. 6. Микроскоп дает возможность полноценно реализовать все методы контраста. Настраиваемая блокировка фокуса и мощный осветитель позволяют комфортно работать с фазовым контрастом и поляризацией.



**Рис. 6. Лабораторный микроскоп Leica DM 2500 P с мощным осветителем.**

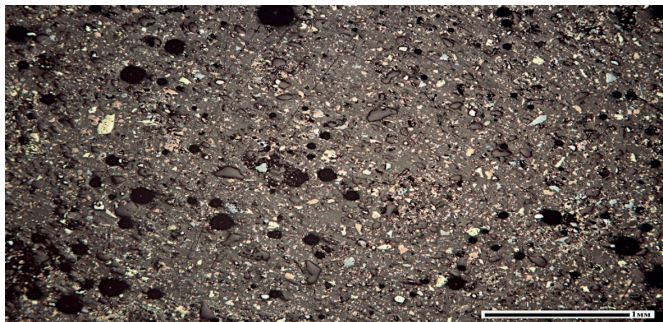
**Сурет 6. Қуатты жарықтандырғышы бар зертханалық Leica DM 2500 P микроскоп.**

**Figure 6. Laboratory microscope Leica DM 2500 P with a powerful illuminator.**

Условные индексы рудных минералов на микрофото- снимках: борнитит bo, ковеллин cv, куприт cp, пирит p, сфалерит spf, халькопирит chp, халькозин ch.

Микрофотосъемка искусственного аншлифа на эпоксидной связке из меднорудного концентрата, состоящего из мономинеральных обломков халькопирита, борнита, кварца, доломита, сульфида меди, а также их сростков, структур вкраплений богмита в нерудных минералах, произведена цифровой камерой Canon D 70.

Для проведения комплекса минералогических и аналитических исследований пробы флотоконцентрата предварительно были подвергнуты последовательной обработке – измельчения/дробления, квартования/сокращения, просеивания и фракционирования [3]. Прошед-



**Рис. 7. Искусственный аншлиф 0946. Общий вид. Размер зерен.**

**Сурет 7. Жасанды аншлиф 0946. Жалпы көрінісі. Дәндерінің өлшемі.**

**Figure 7. Artificial thin section 0946. General view. Grain size.**

шие вышеперечисленную обработку исходные пробы флотоконцентрата истирались для получения фракции с требуемым размером (0,074 ÷ 0,080 мм) с целью последующего проведения рентгенодифракционного анализа фазового состава (XRD), определения локального элементного состава с использованием сканирующего микроскопа с энергодисперсионным анализом (ЭДА), гранулометрического, минералогического и атомно-абсорбционного анализа (ААА).

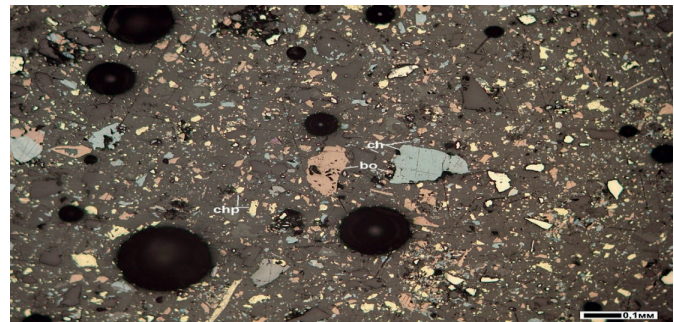
Приведенные на рис. 7–12 микрофотографии, снятые с отполированных аншлифов на эпоксидной связке, показывают характер распределения отдельных металло-сульфидов в концентрате, их процентные соотношения, а также пространственные связи между собой и с другими минералами. Согласно минералогическим расчетам, основными сульфидными минералами концентрата являются халькопирит  $CuFeS_2$  (42,7%), борнит  $Cu_3FeS_4$  (23,7%), сфалерит  $ZnS$  (6,3%) и сульфид меди  $Cu_2S$  (7,6%), а также вторичные минералы богмит  $AlO(OH)$  (2,7%) и алюминий гидроксид силикат  $Al_6Si_4O_{14}(OH)_6$  (2,0%), единичные зерна металлического золота и серебра в незначительном количестве и около 13,1% пустых пород – кварца.

Халькопирит представлен в основном по свободной форме зерен с размерами до 50 мкм. В халькопиритовых зернах иногда наблюдаются шаровидные включения золота и серебра размером около 10 мкм. Сфалерит представлен в основном в виде свободных зерен, а также в комбинациях с другими сульфидными минералами. Наблюдаются места комбинации борнита с халькопиритом и ковеллином.

#### Закключение

При исследовании нами флотоконцентрата «КМФ 25 – 58» представлен спектр с идентификацией определенных элементов, в результате чего выявлено, что основными составляющими элементами являются элементы медь ( $Cu$ ), кислород ( $O$ ), сера ( $S$ ), железо ( $Fe$ ) и кремний ( $Si$ ).

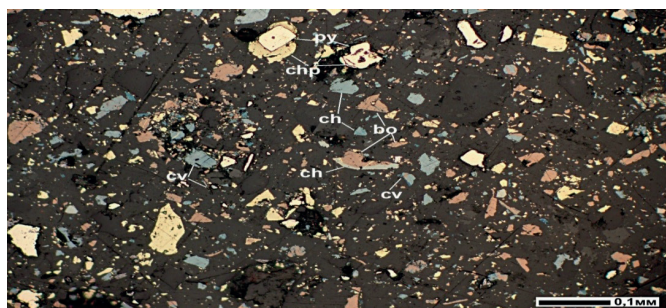
Таким образом, как видно по микрофотографиям, сфалерит всегда присутствует в промышленном медном концентрате, так как мелкие частички этих сульфидов настолько взаимосвязаны с таковыми же зернами халькопирита, что



**Рис. 8. Искусственный аншлиф 0947. Фрагмент (борнит, халькозин, сростки).**

**Сурет 8. Жасанды аншлиф 0947. Фрагмент (борнит, халькозит, қосылыстар).**

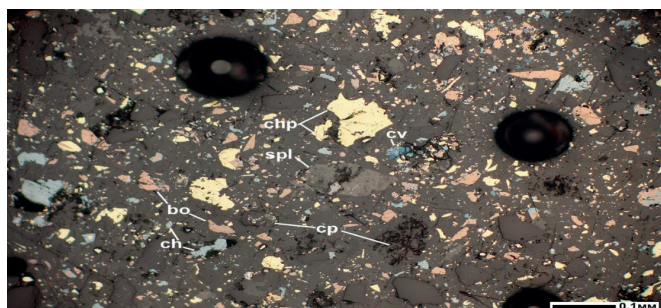
**Figure 8. Artificial thin section 0947. Fragment (bornite, chalcocite, aggregates).**



**Рис. 9.** Искусственный аншлиф 0948 (ковеллин, пирит, борнит, халькопирит).

**Сурет 9.** Жасанды аншлиф 0948 (ковеллин, пирит, борнит, халькопирит).

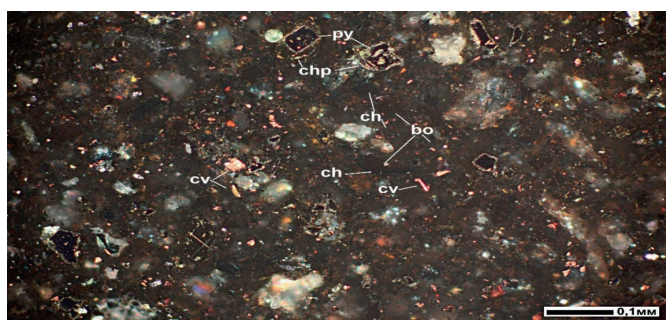
**Figure 9.** Artificial polished section 0948 (covellite, pyrite, bornite, chalcopyrite).



**Рис. 11.** Искусственный аншлиф 0950 (ковеллин, борнит, куприт, сфалерит).

**Сурет 11.** Жасанды аншлиф 0950 (ковеллин, борнит, куприт, сфалерит).

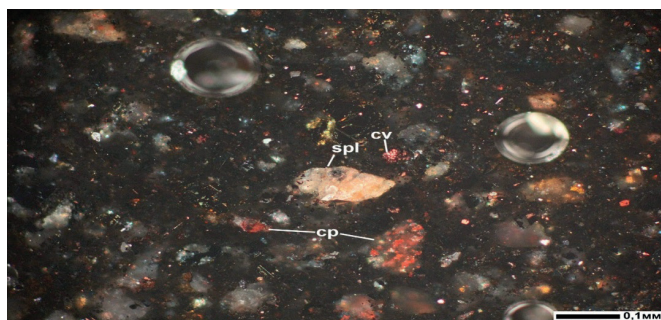
**Figure 11.** Artificial polished section 0950 (covellite, bornite, cuprite, sphalerite).



**Рис. 10.** Искусственный аншлиф 0949 (ковеллин, пирит, борнит, халькопирит).

**Сурет 10.** Жасанды аншлиф 0949 (ковеллин, пирит, борнит, халькопирит).

**Figure 10.** Artificial polished section 0949 (covellite, pyrite, bornite, chalcopyrite).



**Рис. 12.** Искусственный аншлиф 0951 (ковеллин, куприт, сфалерит).

**Сурет 12.** Жасанды аншлиф 0951 (ковеллин, куприт, сфалерит).

**Figure 12.** Artificial polished section 0951 (covellite, cuprite, sphalerite).

их практически никак не удастся разделить путем обычного дробления и размола в обогатительных производствах. Следовательно, медные концентраты, содержащие цинк, не рекомендуются для переработки традиционным пирометаллургическим методом для получения меди, так как оба металла будут безвозвратно потеряны [8]. Во избежание потерь меди и других попутных ценных компонентов, при переработке данного концентрата мы можем рекомендовать гидрометаллургические методы с последующим селективным извлечением из растворов всех ценных компонентов, в том числе меди, цинка, железа [9].

Проведенная работа показала, как комплексный аналитический подход может обеспечить большую производительность, интегрируя геологический и геохимический анализы для улучшения стратегии [10], а заинтересованные стороны, получив на руки конкретные данные по элементному и фазовому составу на данном участке, смогут принимать обоснованные решения относительно дальнейшей разработки и управления ресурсами, что, в итоге, будет способствовать устойчивым методам добычи, гарантируя максимальное обеспечение современных требований по охране окружающей среды [11].

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Чен Дж. Х., Го С. Цз., Ли Х. С. (Август 2020). Реализация и практика интегрированного процесса извлечения меди из низкокачественной руды на руднике Цицизиньшань. *Гидрометаллургия*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304386X19309831> (на английском языке)
2. Марченко Н.В., Вершинина Е.П., Гильдебрандт Э.М. *Металлургия тяжелых цветных металлов: учеб.-метод. пособие: Красноярск: ИПК СФУ, 2009. 394 с. (на русском языке)*
3. Кроусон Ф. Некоторые наблюдения по выходам меди и содержанию руды // *Ресурсная политика*. 2012. Т. 37. С. 59–72 (на английском языке)
4. Иванов Б.В., Бодуэн А.Я., Ягудина Ю.Р. Возможность гидрометаллургического кондиционирования низкосортных концентратов, полученных при переработке медно-колчеданных руд // *Цветные металлы*. 2014. № 11 (863). С. 42–46 (на русском языке)

5. Дурани С., Кришнакумар М., Сатьянараяна К. Разделение твердой фазы и определение примесей редкоземельных элементов в урановом оксиде методом ICP-OES/ICP-MS // Журнал радиохимического и ядерного анализа. 2012. № 294. С. 215–222 (на английском языке)
6. Методы геохимии и геофизики. Гл. 7 – Подготовка лабораторной пробы, 1972. Т. 6. С. 57–70 (на английском языке)
7. Чен Л., Ван Х., Сун С., Чанг Х., Дин В. (2 июня 2025). Применение интегрированного геохимического и геофизического исследования для прогнозирования потенциальных медно-золотых полиметаллических месторождений в районе «Фудийиньцзы – Бачели», провинция «Хэйлунцзян». Минералы. <https://www.mdpi.com/2075-163X/15/6/597> (на английском языке)
8. Саргсян Л.Е., Оганесян А.М., Варданян Д.Г. Исследование фазового и минерального состава медного концентрата с повышенным содержанием цинка и свинца // Наука и современность. 2013. С. 140–145 (на русском языке)
9. Некоторые современные способы переработки медеплавильного шлака / Бекимбаева Г.С. [и др.] // Труды университета. 2024. № 2 (95). С. 32–37 (на русском языке)
10. Мохамед И. Абдель-Фаттах, Хамдан А. Хамдан, Аднан К. Махди, Закария М. Абд-Аллах, Незар А. Хаммури, Сара М. Абузид. (26 ноября 2025). Комплексный подход и новые представления о потенциале сланцевого газа: геологическая, петрофизическая, геохимическая и геомеханическая оценка формации Хататба (Западная пустыня, Египет). Нефтяные исследования. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2096249525001127> (на английском языке)
11. Продвижение к устойчивому развитию: появление технологий и практик «зеленой» добычи полезных ископаемых / Онифаде М. [и др.] // Зеленая и умная горная инженерия. 2024. Т. 1. № 2. С. 157–174 (на английском языке)

#### ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕРДІҢ ТІЗІМІ

1. Чен Дж. Х., Го С. Цз., Ли Х. С. (Тамыз 2020). «Цзицзиньшань» кенішіндегі төмен сапалы кеннен мыс алу үшін біріктірілген процесті іске асыру және тәжірибе. Гидрометаллургия. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304386X19309831> (ағылшын тілінде)
2. Марченко Н.В., Вершинина Е.П., Гильдебрандт Э.М. Ауыр түсті металдардың металлургиясы: оқу-әдістемелік құрал: Красноярск: ИПК СФУ, 2009. 394 б. (орыс тілінде)
3. Кроусон Ф. Мыс шығымдылығы және кен құрамына қатысты кейбір байқаулар // Саясат ресурстар. 2012. Т. 37. Б. 59–72 (ағылшын тілінде)
4. Иванов Б.В., Бодуэн А.Я., Ягудина Ю.Р. Мыс-қорғасын колчедан кендерін өңдеу барысында алынған төмен сапалы концентраттарды гидрометаллургиялық кондициялау мүмкіндігі // Түсті металдар журналы. 2014. № 11 (863). Б. 42–46 (орыс тілінде)
5. Дурани С., Кришнакумар М., Сатьянараяна К. ICP-OES/ICP-MS әдісімен уран оксидіндегі сирек элементтері қоспаларын қатты фазадан бөлу және анықтау // Радиохимиялық және ядролық талдау журналы. 2012. № 294. Б. 215–222 (ағылшын тілінде)
6. Геохимия және геофизика әдістері. 7-тарау – Лабораториялық үлгіні дайындау, 1972. Т. 6. Б. 57–70 (ағылшын тілінде)
7. Чен Л., Ван Х., Сун С., Чанг Х., Дин В. (2 маусым 2025). «Фудийиньцзы – Бачели» ауданындағы, «Хэйлунцзян» провинциясындағы мыс-алтын полиметалл кен орындарының әлеуетін болжау үшін интеграцияланған геохимиялық және геофизикалық зерттеуді қолдану. Минералдар. <https://www.mdpi.com/2075-163X/15/6/597> (ағылшын тілінде)
8. Саргсян Л.Е., Оганесян А.М., Варданян Д.Г. Мыстың концентрацияланған концентратының цинк және қорғасын құрамын арттырғандағы фазалық және минералдық құрамын зерттеу // Ғылым және заман журналы. 2013. Б. 140–145 (орыс тілінде)
9. Мыс балқыту шлактарын өңдеудің кейбір заманауи әдістері / Бекимбаева Г.С. [және т. б.] // Университет еңбектері журналы. 2024. № 2 (95). Б. 32–37 (орыс тілінде)
10. Мохамед И. Абдель-Фаттах, Хамдан А. Хамдан, Аднан К. Махди, Закария М. Абд-Аллах, Незар А. Хаммури, Сара М. (26 қараша 2025). Шельфтік газ әлеуетін интеграцияланған бағалау: Хататба формациясының (Батыс шөл, Мысыр) геологиялық, петрофизикалық, геохимиялық және геомеханикалық зерттеуі. Мұнай зерттеулері журналы. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2096249525001127> (ағылшын тілінде)
11. Тұрақтылыққа жету: жасыл тау-кен технологиялары мен практикаларының пайда болуы / Онифаде М. [және т. б.] // Жасыл және ақылды тау-кен инженериясы. 2024. Т. 1. № 2. Б. 157–174 (ағылшын тілінде)

#### REFERENCES

1. Chen J.H., Guo X.J., Li H.X. (August 2020). Implementation and practice of an integrated process to recover copper from low grade ore at Zijinshan mine. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304386X19309831> (in English)

2. Marchenko N.V., Vershinina E.P., Hildebrandt E.M. *Metallurgiya tyazhelykh tsvetnykh metallov: ucheb. metod. posobie [Metallurgy of Heavy Non-Ferrous Metals: Textbook and Methodological Guide]*. Krasnoyarsk: IPK SFU, 2009. 394 p. (in Russian)
3. Crowson P. *Some Observations on Copper Yields and Ore Grades // Resources Policy*. 2012. V. 37 (1). 59–72 pp. (in English)
4. vanov B.V., Boduen A.Ya., Yagudina Yu.R. *Vozmozhnost' gidrometallurgicheskogo konditsionirovaniya nizkosortnykh kontsentratorov, poluchennykh pri pererabotke medno-kolchedannykh rud [Possibility of hydrometallurgical conditioning of low-grade concentrates obtained from the processing of copper-pyrite ores], svetnye metally [Non-Ferrous Metals]*. 2014. No. 11 (863). 42–46 pp. (in Russian)
5. Durani S., Krishnakumar M., Satyanarayana K. *Solid phase separation and ICP-OES/ICP-MS determination of rare earth impurities in nuclear grade uranium oxide // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2012. No. 294. 215–222 pp. (in English)
6. *Methods in Geochemistry and Geophysics. Chapter 7 – Preparation of the Laboratory Sample, 1972. V. 6.* 57–70 pp. (in English)
7. Chen L., Wang H., Sun C, Chang X., Ding W. (June 2, 2025). *The Application of Integrated Geochemical and Geophysical Exploration for Prospecting Potential Prediction of Copper and Gold Polymetallic Deposits in the Fudiyngzi – Bacheli Area, Heilongjiang Province. Minerals*. <https://www.mdpi.com/2075-163X/15/6/597> (in English)
8. Sargsyan L.E., Oganesyanyan A.M., Vardanyan D.G. *Issledovanie fazovogo i mineral'nogo sostava mednogo kontsentrata s povyshennym soderzhanie tsinka i svintsa [Study of the Phase and Mineral Composition of Copper Concentrate with Increased Zinc and Lead Content], Nauka i sovremennost' [Science and Modernity]*. 2013. 140–145 pp. (in Russian)
9. *Nekotorye sovremennye sposoby pererabotki medeplavil'nogo shlaka [Some Modern Methods of Processing Copper Smelting Slag], Bekimbaeva G.S. [et al.], Trudy universiteta [Proceedings of the University]*. 2024. No. 2 (95). 32–37 pp. (in Russian)
10. Mohamed I. Abdel-Fattah, Hamdan A. Hamdan, Adnan Q. Mahdi, Zakaria M. Abd-Allah, Nezar A. Hammouri, Sara M. Abuzied. (November 26, 2025). *Integrated Approach and Insights into Shale Gas Potential: Geological, Petrophysical, Geochemical, and Geomechanical Evaluation of the Khatatba Formation (Western Desert, Egypt). Petroleum Research*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2096249525001127> (in English)
11. *Advancing toward sustainability: The emergence of green mining technologies and practices / Onifade M. [et al.] // Green and Smart Mining Engineering*. 2024. V. 1. No. 2. 157–174 pp. (in English)

#### Информация об авторах:

**Карманов Е.М.**, докторант кафедры «Металлургия и обогащение полезных ископаемых», Казахский национальный исследовательский университет им. К.И. Сатпаева (г. Алматы, Казахстан), [yerposhock@gmail.com](mailto:yerposhock@gmail.com); <https://orcid.org/0009-0005-0555-9078>

**Барменишинова М.Б.**, канд. техн. наук, ассоциированный профессор, заведующая кафедрой «Металлургия и обогащение полезных ископаемых», Казахский национальный исследовательский университет им. К.И. Сатпаева (г. Алматы, Казахстан), [m.barmenshinova@satbayev.university](mailto:m.barmenshinova@satbayev.university); <https://orcid.org/0000-0003-0534-2387>

**Шарипов Р.В.**, магистр, инженер кафедры «Химические процессы и промышленная экология», Казахский национальный исследовательский университет им. К.И. Сатпаева (г. Алматы, Казахстан), [rustem.sharipov@satbayev.university](mailto:rustem.sharipov@satbayev.university); <https://orcid.org/0009-0001-2911-5026>

#### Авторлар туралы мәліметтер:

**Карманов Е.М.**, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу университеті «Металлургия және пайдалы қазбаларды байыту» кафедрасының докторанты (Алматы қ., Қазақстан)

**Барменишинова М.Б.**, техн. ғылым. канд., қауымдастырылған профессор, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу университеті «Металлургия және пайдалы қазбаларды байыту» кафедрасының меңгерушісі (Алматы қ., Қазақстан)

**Шарипов Р.В.**, магистр, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу университетінің «Химиялық процестер және өнеркәсіптік экология» кафедрасының инженері (Алматы қ., Қазақстан)

#### Information about the authors:

**Karmanov Ye.M.**, doctoral student at the «Department of Metallurgy and Mineral Processing», Kazakh National Research University named after K.I. Satpayev (Almaty, Kazakhstan)

**Barmenshinova M.B.**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the «Department of Metallurgy and Mineral Processing» at Kazakh National Research University named after K.I. Satpayev (Almaty, Kazakhstan)

**Sharipov R.V.**, MS, Engineer at the «Department of Chemical Processes and Industrial Ecology», Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satbayev (Almaty, Kazakhstan)