

УДК 669.02.09

МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И СПОСОБЫ ПЕРЕРАБОТКИ МЕДНЫХ ЦИНКСОДЕРЖАЩИХ КОНЦЕНТРАТОВ (УЧАЛИНСКИЙ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫЙ КОМБИНАТ)

Васильева Анна Андреевна¹,
fml0914@mail.ru

Бодуэн Анна Ярославовна¹,
Boduen_aya@pers.spmi.ru

¹ Санкт-Петербургский Горный университет,
Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я лин. В.О., 2.

Актуальность. Медно-колчеданные руды России представляют собой основу минерально-сырьевой базы металлургической промышленности страны, в первую очередь обеспечивая медью и цинком, и такими металлами, как Pb, Au, Ag и т. д. На сегодняшний день около 25 % из общего количества балансовых запасов цинка страны находится в составе медно-колчеданных руд, роль основного компонента в которых выполняет медь. Результатом флотационного обогащения медноколчеданных руд является получение некондиционных медных концентратов (содержание Cu ~15–20 %, содержание Zn ≥5 %). Пирометаллургической переработке таких материалов на черную медь характерны высокие затраты, а также безвозвратные потери ценных компонентов. На сегодняшний день вопросы изучения характеристик исходных материалов и месторождений, разработки технологий переработки медь- и цинксо­дер­жащих материалов, а также анализа существующих и перспективных вариантов переработки являются актуальными и, как результат, способными оказать положительный эффект как с точки зрения комплексности использования сырья, повышения качества получаемых продуктов и степени их извлечения, так и, следовательно, с экономической точки зрения.

Цель. Анализ особенностей медных цинксо­дер­жащих руд, в частности руд Учалинского и Верхнеуральского меднорудных районов, обогащаемых на Учалинском горно-обога­ти­тель­ном комбинате, минералогическая оценка концентратов Учалинского горно-обога­ти­тель­ного комбината с последующим выбором перспективных вариантов переработки низкосортных медных концентратов, основанных на гидрометаллургических способах обработки.

Методы. Анализ данных об основных типах месторождений меди, характеристике медно-колчеданных руд России, а также более подробных данных о рудах, обогащаемых на горно-обога­ти­тель­ном комбинате, проводился на основе обзора отечественных и зарубежных литературных и информационных источников. Также произведен анализ концентрата и промпродукта Учалинского горно-обога­ти­тель­ного комбината. Благодаря полученной посредством совокупности вышеуказанных методов информации проведена оценка и изложена информация о возможных вариантах усовершенствования технологий переработки исследуемого сырья.

Результаты. Благодаря изучению и разработке более комплексных подходов в переработке материалов с низким содержанием полезных компонентов и комплексного сырья, в частности, изученного в данной работе, в дальнейшем станет возможным достижение улучшенных технологических показателей как с экономической, так и с экологической точек зрения. В настоящей работе более подробно будут рассмотрены сырье и продукция, применяемые и получаемые, соответственно, на Учалинском горно-обога­ти­тель­ном комбинате, республика Башкирия.

Ключевые слова:

медные концентраты, гидрометаллургическое кондиционирование, атмосферное выщелачивание, сульфидное сырье, автоклавное окисление, механоактивация.

Введение

Одно из важнейших направлений для оптимизации и улучшения показателей производства в сферах освоения рудных месторождений, последующего обогащения добытых руд, а также металлургической переработки полученных концентратов – рациональное использование природных ресурсов, а также ресурсов техногенного происхождения. Стремительное развитие горной промышленности отразилось на истощении балансовых запасов месторождений (богатых по своему содержанию) и, параллельно с этим, на росте объемов техногенного сырья, складываемого на поверхности Земли [1].

Содержание ценных компонентов в рудах, добываемых на месторождениях Южного Урала медно-колчеданного типа, снизилось весьма значительно за последние 50 лет: содержание Cu стало меньше в

~2,5 раза, количество Zn упало приблизительно в 3 раза, а Au и Ag – в 2 и ~1,5 раза, соответственно. При этом доля труднообога­ти­мых руд увеличилась до 40 % (от общего количества применяемого сырья), но при этом уровень сквозного извлечения полезных компонентов сырья сохранился на неизменном уровне: в недрах Земли, а также в процессе переработки остаётся порядка 50 % полезных ископаемых [2].

В настоящий момент на территории России накоплены значительные количества техногенных отходов производств, которые в большинстве своём могут быть рассмотрены в качестве дополнительных ресурсов для переработки и доизвлечения из них полезных компонентов, поскольку зачастую качественные характеристики таких материалов могут быть сопоставимы с показателями перспективных или эксплуатируемых месторождений. Так, в процессе переработки руд медно-колчеданных месторождений на Урале

было получено более 1,5 млрд т техногенного сырья, которое, в свою очередь, представляет интерес как альтернативный источник для дальнейшей переработки с целью получения ряда ценных компонентов, таких как цинк, медь, а также другие цветные, редкие и драгоценные металлы.

Одним из важнейших предприятий по добыче и переработке колчеданных руд является Учалинский горно-обогатительный комбинат (ГОК) – часть крупного промышленного холдинга «Уральская горно-металлургическая компания» (УГМК). Помимо АО «Учалинский ГОК» в минерально-сырьевой комплекс УГМК также входят ПАО «Гайский ГОК», АО «Сибирь-полиметаллы», АО «Сафьяновская медь», ЗАО «Урупский ГОК», ООО «Башкирская медь», АО «Бурibaевский ГОК», АО «Сибайский ГОК», а также Северный медно-цинковый рудник и Волковское месторождение, работающие в составе АО «Святогор». Ежегодная добыча и переработка руд этими предприятиями составляет более 24 млн т [3].

Типы месторождений меди и характеристика медно-колчеданных руд России

На сегодняшний день около 15 % из числа разведанных мировых запасов меди обладает Россия [4]. В целом главные месторождения меди подразделяются на шесть основных типов, имеющих разный характер происхождения и образовавшихся в различных геолого-тектонических обстановках [5–7]:

- медно-порфировые (которые, в свою очередь, подразделяются на золото-медно-порфировые, молибден-медно-порфировые и, соответственно, медно-порфировые подтипы) [8];
- колчеданные (медно-колчеданные, медно-цинково-колчеданные и колчеданно-полиметаллические подтипы);
- стратиформные (заключённые в медистых песчаниках и сланцах);
- сульфидные медно-никелевые;
- скарновые;
- гидротермально-метасоматические.

Колчеданные месторождения представляют собой залежи сернистых (сульфидных) соединений металлов в недрах Земли, которые обладают промышленным значением. Основу данных месторождений составляют руды, состоящие в большинстве своём из сульфидов железа. Такие руды относят к одним из важных источников ряда цветных (медь, цинк, свинец, золото, серебро и др.), редких металлов и рассеянных элементов [9]. По причине роста отраслевых потребностей в стране крайне актуальными являются ряд вопросов: от поиска новых месторождений и продолжения разработки уже известных до нахождения более перспективных комплексных технологий дальнейшей переработки руд и концентратов.

На территории Урала заключены значительные количества колчеданных месторождений, более того, там присутствуют все четыре типа колчеданных месторождений, различающихся по формациям, способам формирования и минеральному составу. Общая

классификация колчеданных месторождений приведена в табл. 1 [9]. По мнению автора [9], за время геологической истории Земли было накоплено порядка 10,7 млрд т руд колчеданного типа, содержащих в себе не менее 121,2 млн т Cu, около 362,6 млн т Zn и более 144 млн т Pb. При этом в долгосрочной перспективе данный тип руд продолжает оставаться ведущим типом медных руд на Урале даже при наличии там и других геолого-промышленных типов, таких как медно-порфировый, медно-скарновый, медистые глины и др. Поэтому с точки зрения важности научно-исследовательских задач и выполнения геолого-разведочных работ крайне актуальным и перспективным является изучение колчеданности Урала, в том числе потенциальной промышленной рудоносности допалеозойских образований (при наличии соответствующих осадочно-вулканогенных ассоциаций) с учетом их высокой глобальной продуктивности.

Таблица 1. Классификация колчеданных месторождений
Table 1. Classification of pyrite deposits

Генезис происхождения Genesis of origin	Тип и формация Type and formation
<ul style="list-style-type: none"> • вулканогенные гидротермально-осадочные volcanogenic hydrothermal-sedimentary; • вулканогенные гидротермально-метасоматические volcanogenic hydrothermal-metasomatic; • комбинированные (сочетают в себе две первых группы месторождений) combined (combine the first two groups of deposits) 	<ul style="list-style-type: none"> • кипрский тип (серно-медно-колчеданная кобальтоносная рудная формация)/Surgus type of deposits (sulphur-copper-pyrite cobalt-bearing ore formation); • уральский тип (медно-цинково-колчеданная рудная формация)/Ural type (copper-zinc-sulfide ore formation); • рудноалтайский (Куроко) тип (медно-цинково-колчеданная свинецсодержащая рудная формация)/Rudno-Altai (Kuroko) type (copper-zinc-pyrite lead-bearing ore formation); • филизчайский тип (Бесши) (свинцово-цинково-колчеданная рудная формация)/Filizchay type (Besshi) (lead-zinc-sulfide ore formation)

С точки зрения рассмотрения основных составляющих минералов колчеданных месторождений можно сделать вывод, что минеральный состав различных типов весьма похож (в частности, главенствующую роль в каждом выполняет пирит), при этом имеют место и различия (табл. 2) [9].

В России большая доля запасов медно-колчеданных руд сосредоточена на территории Южного Урала. Месторождения данного типа по глубине их залегания принято подразделять на три основных группы:

- глубокозалегающие месторождения (Узельгинское, Талганское, Подольское, Ново-Учалинское);
- месторождения средних глубин (Учалинское, Озёрное, Западно-Озёрное, Молодёжное, Октябрьское, Гайское, Сибайское [10], Юбилейное);
- месторождения малых глубин (Чебачье, Камаган, Таш-Тау, Александринское, Майское, Балта-Тау, Восточно-Семёновское).

Таблица 2. Минеральный состав руд колчеданных месторождений

Table 2. Mineral composition of ores from pyrite deposits

Минералы Minerals	Тип/Type			
	Кипрский Cyprus	Уральский Ural	Рудноалтайский (Куроко) Rudno-Altai (Kuroko)	Филизчайский (Бесши) Filizchay (Besshi)
Главные Main	Пирротин, пирит Pyrrhotite, pyrite	Пирит, халькопирит, сфалерит Pyrite, chalcopyrite, sphalerite	Пирит, сфалерит, халькопирит, галенит, барит Pyrite, sphalerite, chalcopyrite, galena, barite	Сфалерит, галенит, пирит, барит Sphalerite, galena, pyrite, barite
Широко распространённые Widespread	Магнетит, халькопирит Magnetite, chalcopyrite	Борнит (иногда главный) Bornite (sometimes main)	Блеклые руды, самородное золото Gray ores, native gold	–
Второстепенные Secondary	Пентландит, кобальтин Pentlandite, cobaltite	Магнетит, гематит, пирротин, галенит Magnetite, hematite, pyrrhotite, galena	Пирротин, магнетит, борнит, халькозин, энаргит Pyrrhotite, magnetite, bornite, chalcocite, enargite	Халькопирит Chalcopyrite
Редко встречающиеся Rare	Кубанит, валлериит, никелин, бравоит, миллерит Cubanite, valleriite, nickelite, bravoite, millerite	Блеклые руды, ковеллин, халькозин, арсенопирит, марказит, самородное золото Gray ores, covellite, chalcocite, arsenopyrite, marcasite, native gold	Арсенопирит, магнетит, пирротин, халькозин Arsenopyrite, magnetite, pyrrhotite, chalcocite	Пирротин, магнетит, блеклые руды, марказит Pyrrhotite, magnetite, gray ores, marcasite
Очень редко встречающиеся Very rare	Арсенопирит, платиноиды Arsenopyrite, platinumoids	Энаргит, валлериит, ильменит, теллуросмугит, маккинавит, ильваит, рутил, кубанит, халькозин и др. Enargite, valleriite, ilmenite, tellurobismuthite, mackinawite, ilvaite, rutile, cubanite, chalcocite, etc.	Ковеллин, самородное серебро, валлериит, рутил, арсенопирит, молибденит Covellite, native silver, valleriite, rutile, arsenopyrite, molybdenite	–

Процессы переработки медьсодержащих руд и последующего извлечения из них ценной составляющей зачастую сопровождаются попутным получением ряда других полезных компонентов, в частности в роли одного из таких компонентов выступает цинк (табл. 3) [1]. В целом в области добычи цинка выделяются два основных направления добычи: на территории Урала (республика Башкортостан, Оренбургская, Челябинская и Свердловская области) и в Сибири, соответственно.

Таблица 3. Содержание цинка в месторождениях Урала и Сибири

Table 3. Zinc content in deposits of the Ural and Siberia

Тип месторождений Type of deposits	Название месторождения Name of deposit	Содержание цинка, % Zn content, %
Медно-колчеданный Copper pyrite	Ново-Учалинское Novo-Uchalinskoe	2,95
	Узельгинское Uzelginskoe	2,4
	Ново-Шемурское Novo-Shemurskoe	1,62
	Юбилейное Yubileynoe	1,26
	Гайское/Gayskoe	0,55
Свинцово-цинковый Lead-zinc	Кызыл-Таштыгское Kyzyl-Tashtygskoe	10,4
	Корбалихинское Korbalihinskoe	10
	Степное/Stepnoe	8,07
	Озёрное/Ozernoe	6,8
	Горевское/Gorevskoe	1,4
	Нойон-Тологой Noyon-Tologoy	1,3

История Учалинского ГОК (предприятие сырьевоего комплекса УГМК) насчитывает ~260 млн т добытой руды с семи месторождений (Учалинского и Верхнеуральского районов). Найденные медно-

цинковые колчеданные руды на Учалинском золоторудном месторождении, открытом в 1939 г., дали начало для разработок месторождения в промышленном масштабе. На сегодняшний момент в состав УГОК входят два подземных рудника (Узельгинский и Учалинский, разрабатывающие месторождения медно-колчеданных и медно-цинковых колчеданных руд), карьер и непосредственно обогатительная фабрика, располагающаяся в городе Учалы (республика Башкирия) на которой с 1954 г. получают концентраты посредством обработки добытого сырья. Основные показатели комбината за 2020 г.: добыча – 6,2 млн т руды, выпуск цинка в концентрате – 60,9 тыс. т, выпуск меди в концентрате – 46,3 тыс. т. С целью стабильного функционирования и продолжения деятельности с 2008 г. горняками осуществляется разработка и проводятся горнопроходческие работы на Ново-Учалинском месторождении, открытом в 1986 г., с которым УГОК связывает свою будущую деятельность [11].

В настоящее время на АО «Учалинский ГОК» ведётся переработка шести основных месторождений: Учалинский рудник: Учалинское и Западно-Озёрное месторождения, Узельгинский рудник: Узельгинское, Талганское, Озёрное и Молодёжное месторождения. Также в 2018 г. была вскрыта руда ещё одного месторождения – Ново-Учалинского (2,95 % Zn в руде, 0,99 % Cu в руде). Особенностью последнего из упомянутых месторождений является то, что оно относится к существенно цинковому подтипу (Zn>>Cu), что отличает его от большинства уральских колчеданных залежей [12, 13]. В целом руды данного месторождения по своему минеральному составу не отличаются от типичных руд колчеданных месторождений уральского типа, и среди них выделяют медно-колчеданные (39 % от всех запасов), медно-цинковые колчеданные (54 %) со

средним отношением Cu:Zn=1:3 и серноколчеданные (4 %) [14]. По данным [1] полное завершение строительства и начало эксплуатации Ново-Учалинского месторождения планируется в 2023 г.

Особенности руд Учалинского и Верхнеуральского меднорудных районов, обогащаемых на УГОК

Как было отмечено ранее, медно-колчеданные месторождения в первую очередь являются важным ис-

точником таких металлов, как медь и цинк, а также свинец, золото, серебро, мышьяк и т. д.

Наряду с Гайским ГОК Учалинский ГОК является одним из ведущих медеперерабатывающих предприятий на Урале. В совокупности на них приходится более 75 % всего производства медных концентратов и почти 90 % производства цинковых концентратов [15].

Таблица 4. Компонентный состав месторождений Учалинского и Верхнеуральского меднорудных районов

Table 4. Component composition of the deposits of the Uchalinsky and Verkhneursky copper ore regions

Месторождение Deposit	Главные компоненты Main components	Полезные компоненты Valuable component	Вредные компоненты Harmful component
Учалинское Uchalinskoe	Cu 1,02 %, Zn 3,2 %, S, Au, Ag	Pb, Mo, Co, Ge, Sc, Sn, Pt, V, P	As, Sb, F, Hg
Ново-Учалинское Novo-Uchalinskoe	Cu 0,95 %, Zn 2,6 %, S	Au, Ag, Se, Te, Cd, In	As, Sb, F, Hg
Узельгинское Uzelginskoe	Cu 1,34 %, Zn 2,62 %, S	Au 1,73 г/т, Ag 30,99 г/т, Te, Cd, In, Ba, Pb, Co, Bi, Ni, Ge, Tl	As, Sb, F
Западно-Озёрное Zapadno-Ozernoe	Cu 0,82 %, Zn 0,74 %, S 42,5 %	Se 0,022 %, Au 1,49 г/т, Ag 2,3 г/т, Te, Cd, In, Pb, Ga, Co, Bi, Ni, Ge, Tl	As, Sb, F, Hg
Озёрное Ozernoe	Cu 1,91 %, S	Zn 0,57 %, Au 0,81 г/т, Ag 11,87 г/т, Se 0,034 %, Te, In, Cd, Tl, Ga, Ge, Pb, Co, Bi, Ni	As, Sb, F
Талганское Talganskoe	Cu 3,37 %, Zn 3,39 %, S	Ba, Se, Te, In, Cd, Ga, Tl, Ge	Pb, As, Sb, F, Hg
Молодёжное Molodezhnoe	Cu 2,56 %, Zn 0,52 %, S	Au 2,8 г/т, Ag 58,4 г/т, Ba, Se, Te, In, Cd, Co, Ni, Mo, Bi, Tl, Ge, Ga	As, Sb

Таблица 5. Минеральный состав месторождений Учалинского и Верхнеуральского меднорудных районов

Table 5. Mineral composition of the deposits of the Uchalinsky and Verkhneursky copper ore regions

Месторождение Deposit	Минералы/Minerals			
	Рудные/Metallic		Нерудные/Non-metallic	
	Главные Main	Второстепенные Minor	Главные Main	Второстепенные Minor
Учалинское Uchalinskoe	Пирит, халькопирит, сфалерит Pyrite, chalcopyrite, sphalerite	Теннантит, галенит, магнетит, гематит, борнит Tennantite, galena, magnetite, hematite, bornite	Кварц, серицит, хлорит, барит, кальцит Quartz, sericite, chlorite, barite, calcite	Сидерит, гипс, арагонит, гранат, турмалин, опал, монтмориллонит, ярозит, вивинит Siderite, gypsum, aragonite, garnet, tourmaline, opal, montmorillonite, jarosite, vivianite
Ново-Учалинское Novo-Uchalinskoe	Пирит, халькопирит, сфалерит Pyrite, chalcopyrite, sphalerite	Блеклые руды, галенит, магнетит Gray ores, galena, magnetite	Кварц, барит, серицит, хлорит, кальцит Quartz, barite, sericite, chlorite, calcite	Лейкоксен, аксинит Leucoxene, axinite
Узельгинское Uzelginskoe	Халькопирит, сфалерит, блеклая руда, пирротин, пирротин-пирит Chalcopyrite, sphalerite, gray ores, pyrrhotite-pyrite	Галенит, арсенопирит, магнетит, марказит Galena, arsenopyrite, magnetite, marcasite	Кварц, кальцит, серицит, хлорит и гипс Quartz, calcite, sericite, chlorite, gypsum	Барит Barite
Западно-Озёрное Zapadno-Ozernoe	Пирит, халькопирит, сфалерит Pyrite, chalcopyrite, sphalerite	Галенит, блеклая руда, марказит, пирротин, арсенопирит Galena, gray ores, marcasite, pyrrhotite, arsenopyrite	Кварц, хлорит, серицит, кальцит, барит Quartz, chlorite, sericite, calcite, barite	Плагиоклаз, амфибол Plagioclase, amphibole
Озёрное Ozernoe	Пирит, пирротин, халькопирит, сфалерит Pyrite, pyrrhotite, chalcopyrite, sphalerite	Магнетит, арсенопирит Magnetite, arsenopyrite	Кварц, хлорит, серицит, кальцит Quartz, chlorite, sericite, calcite	Барит Barite
Талганское Talganskoe	Пирит, халькопирит, сфалерит, блеклая руда Pyrite, chalcopyrite, sphalerite, gray ores	Галенит, борнит, гематит Galena, bornite, hematite	Кварц, хлорит, серицит Quartz, chlorite, sericite	Кальцит, барит Calcite, barite
Молодёжное Molodezhnoe	Пирит, сфалерит, халькопирит, борнит, теннантит Pyrite, sphalerite, chalcopyrite, bornite, tennantite	Галенит, магнетит, гематит Galena, magnetite, hematite	Барит, кварц, серицит, хлорит, гипс, кальцит Barite, quartz, sericite, chlorite, gypsum, calcite	Эпидот, флюорит Epidote, fluorite

По минеральному составу и генетическим характеристикам месторождения, принадлежащие Верхнеуральскому и Учалинскому меднорудным районам, соответствуют уральскому типу [16]. Характеристика вещественного состава данных руд приведена в табл. 4, 5 [2].

Учалинское месторождение (одно из самых крупных на Южном Урале) на сегодняшний день практически отработано, помимо этого также дорабатываются запасы ряда других важных месторождений, как Озёрное, Молодёжное, Узельгинское, Талганское. По этой причине целесообразными для переработки являются резервные месторождения (Ново-Учалинское, Западно-Озёрное). Ново-Учалинское месторождение (медно-цинковое колчеданное), расположенное в двух километрах от Учалинского рудника рассматривается с точки зрения его перспективности как сырьевой базы, имеющей возможность восполнить снижающиеся мощности других рудников УГОК.

Характеристика концентратов Учалинского ГОК

На базе ОАО «Учалинский ГОК» производится различная основная и вспомогательная продукция, в том числе медный и цинковый концентраты. В результате последовательных стадий обогащения получают готовый медный концентрат (содержание Cu ~17,5 %), медьсодержащий промпродукт (содержание Cu ~7,5 %) и готовый цинковый концентрат (содержание Zn ~49 %) [17].

Порошкообразные образцы промпродукта и медного концентрата, полученные с Учалинского ГОК, были проанализированы с помощью рентгенофазового анализа с целью получения информации об их минеральном составе как одной из важных вспомогательных составляющих для их последующего изучения и разработки технологии, которая смогла бы обеспечить более полное извлечение полезных ком-

понентов сырья и, тем самым, повысить комплексность переработки.

Далее посредством использования многофункционального рентгеновского дифрактометра ДРОН-8 (АО «ИЦ «Буревестник») с применением рентгеновской трубки типа 1,5 БСВ-29Cu была осуществлена оценка минералогического состава проб. Данные рентгенофазового анализа приведены в табл. 6, на рис. 2, 3 приведены полученные изображения дифрактограмм с нанесёнными метками фаз на соответствующих пиках. Также для большей наглядности данные табл. 6 приведены на рис. 1 в виде круговых диаграмм.

Таблица 6. Данные рентгенофазового анализа (концентрата и промпродукта УГОК)

Table 6. XRD analysis data (concentrate and middling product of Uchalinsky Mining and Processing Plant)

Минерал Mineral	Химическая формула Chemical composition	Содержание фаз Phase content, %			
		Концентрат Concentrate		Промпродукт Middling product	
Пирит/Pyrite	FeS ₂ (cubic)	~20	40	~35	55
Сфалерит Sphalerite	ZnS (cubic)	~9		~20	
Халькопирит Chalcopyrite	CuFeS ₂ (tetragonal)	55		16	
Теннантит Tennantite	Cu ₁₂ As ₄ S ₁₃ (cubic)	9		10	
Кварц/Quartz	SiO ₂ (hexagonal)	–		7	
Гипс Gypsum	CaSO ₄ *2H ₂ O (monoclinic)	1		4	
Гуннингит Gunningite	ZnSO ₄ *H ₂ O (monoclinic)	2		4	
Пирротин Pyrrhotite	Fe _{1-x} S (hexagonal)	1		2	
Бёдантит Beaudantite	PbFe ₃ ((As,S)O ₄) ₂ (OH) ₆ (rhombohedral)	3		2	



Рис. 1. Графическое изображение содержания фаз в образцах концентрата и промпродукта

Fig. 1. Graphical representation of the content of phases in samples of concentrate and middling product

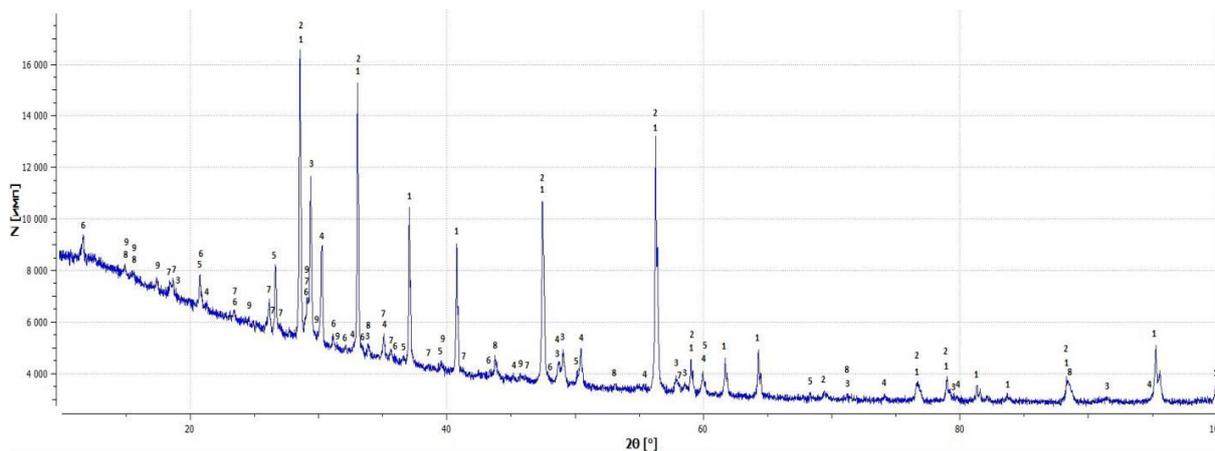


Рис. 2. Рентгенограмма промпродукта УГОК, где 1 – FeS_2 , 2 – ZnS , 3 – $CuFeS_2$, 4 – $Cu_{12}As_4S_{13}$, 5 – SiO_2 , 6 – $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, 7 – $ZnSO_4 \cdot H_2O$, 8 – $Fe_{1-x}S$, 9 – $PbFe_3((As,S)O_4)_2(OH)_6$

Fig. 2. XRD pattern for middling product, where 1 – FeS_2 , 2 – ZnS , 3 – $CuFeS_2$, 4 – $Cu_{12}As_4S_{13}$, 5 – SiO_2 , 6 – $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, 7 – $ZnSO_4 \cdot H_2O$, 8 – $Fe_{1-x}S$, 9 – $PbFe_3((As,S)O_4)_2(OH)_6$

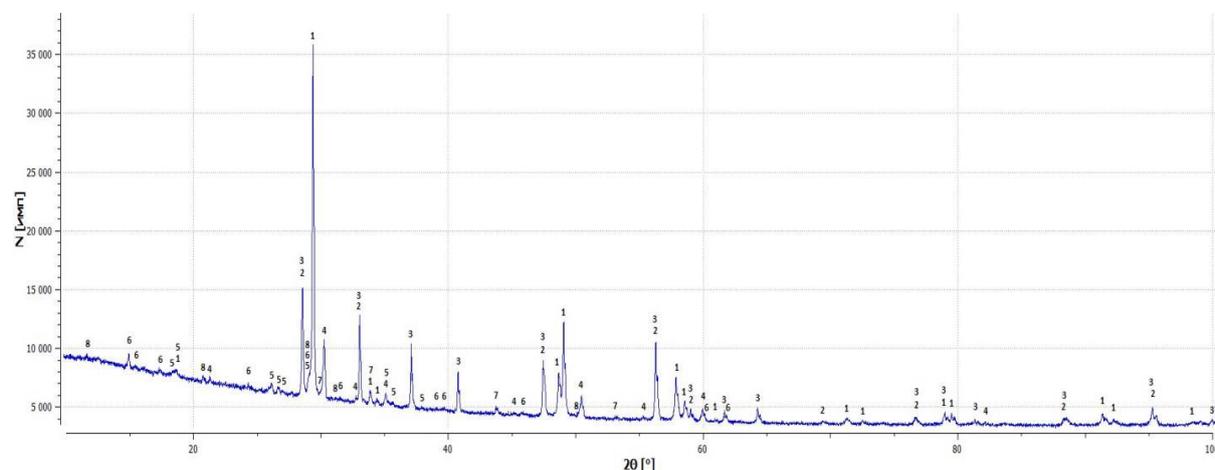


Рис. 3. Рентгенограмма медного концентрата УГОК, где 1 – $CuFeS_2$, 2 – ZnS , 3 – FeS_2 , 4 – $Cu_{12}As_4S_{13}$, 5 – $ZnSO_4 \cdot H_2O$, 6 – $PbFe_3((As,S)O_4)_2(OH)_6$, 7 – $Fe_{1-x}S$, 8 – $CaSO_4 \cdot 2H_2O$

Fig. 3. XRD pattern for concentrate, where 1 – $CuFeS_2$, 2 – ZnS , 3 – FeS_2 , 4 – $Cu_{12}As_4S_{13}$, 5 – $ZnSO_4 \cdot H_2O$, 6 – $PbFe_3((As,S)O_4)_2(OH)_6$, 7 – $Fe_{1-x}S$, 8 – $CaSO_4 \cdot 2H_2O$

Данные о минералогическом составе показали, что содержание халькопирита в концентрате возросло более чем в три раза по сравнению с его количеством в промпродукте, при этом количество остальных соединений снизилось значительно, в частности содержание пирита и сфалерита снизилось почти в два раза, что можно отметить и для большинства остальных обнаруженных в образцах соединений. Также стоит отметить, что содержание вспомогательных элементов (в частности, таких как цинк и мышьяк) при их пересчёте в целом находится на уровне, рациональном для их сопутного извлечения из сырья.

Возможности и перспективы последующей переработки Учалинских концентратов

Как было указано ранее, в целом для руд данного региона можно отметить снижение содержания ценных компонентов, при этом отмечается рост содержания таких элементов, как мышьяк, сурьма, свинец, ртуть, фтор. В связи с этим такое сырье характеризуется мультикомпонентностью, структурными особенностями и сложностью переработки.

Исследования возможности оптимизации технологических схем переработки рассматриваемых концентратов являются весьма актуальными, и одной из основных причин этому служит высокое содержание представляющих ценность побочных компонентов, входящих в их состав, например, таких как мышьяк и цинк. На сегодняшний день были проведены эксперименты по определению эффективности селективного извлечения мышьяка. В работе [18] были осуществлены опыты по щелочному сульфидному выщелачиванию концентрированным раствором (смесь сульфида и гидроксида натрия) с целью перевода сульфидов мышьяка в растворимые формы. Щелочное выщелачивание медных концентратов и промежуточных продуктов сульфидом натрия эффективно удаляет мышьяк и обеспечивает получение «чистого» медного продукта. В связи с этим селективное выщелачивание мышьяка и сурьмы сернистым натрием в щелочных растворах является весьма перспективным способом улучшения качества медных концентратов для последующей плавки.

Выбор наиболее эффективной методики для выделения такого полезного компонента, как цинк, из продуктов, получаемых на УГОК, остаётся открытым. В ряде научных статей приведена информация о существующих вариантах переработки колчеданного сырья, в том числе с высоким содержанием цинка. В настоящий момент освоены два основных пути переработки таких концентратов – пирометаллургические способы и гидрометаллургические технологии. Несмотря на то, что применение пиро-процессов всё ещё является преобладающим вариантом при переработке такого сырья, мы можем наблюдать постепенный рост уровня производства меди и цинка с помощью гидрометаллургических методов [19–22].

В целом нельзя отрицать целесообразность перехода от стандартных способов обработки материалов, получивших широкое распространение в производстве (для которых всё чаще становится характерным снижение эффективности и с экономической точки зрения и во многих случаях с точки зрения их пагубного воздействия на экологию (в случае применения пирометаллургических технологий)) к разработке и последующему применению новых способов комплексной переработки сложного, а также зачастую более низкосортного исходного сырья (такого как хвостовые отвалы, бедные забалансовые руды и различные отходы производства). Такая смена направления схем производства позволит обеспечить положительные результаты и сохранить прибыльность металлургического сектора.

В настоящее время подавляющая часть способов переработки медно-цинкового сырья основана на

проведении пирометаллургических операций. В ходе пиро-процессов происходит полная потеря цинка, поскольку в данных условиях этот металл полностью переходит в шлак медной плавки. В этой связи в качестве альтернативного варианта пиро-процессам для извлечения металлов, в том числе цинка, из некондиционного сырья возможно применение гидрометаллургических технологий [23]. При этом важно заметить, что гидрометаллургические схемы переработки могут вызывать ряд трудностей, так весьма сложной может быть переработка медно-цинковых сульфидных концентратов с содержанием цинка до 18 % по причине того, что эксплуатируемые на данный момент гидро-процессы позволяют получить лишь такие растворы, которые не могут быть использованы для последующего производства товарной продукции по причине низкого содержания цинка в них.

В качестве одного из вариантов, дающих возможность улучшить показатели переработки сульфидных концентратов (в частности, медных с высоким содержанием цинка), а также уменьшить степень применения пирометаллургических процессов для переработки медно-цинкового сырья, выступает автоклавное выщелачивание, в котором с помощью высоких давлений и температур газа достигаются довольно высокие показатели уровня и скорости вскрытия сырья. К таким схемам можно отнести проект MT Gordon [24], процессы Platsol [25] и CESL (Cominco Engineering Services Ltd.) [26], процесс ГТО [27] (гидротермальная обработка) и др. Один из вариантов технологической схемы с использованием автоклавного выщелачивания приведён на рис. 4.

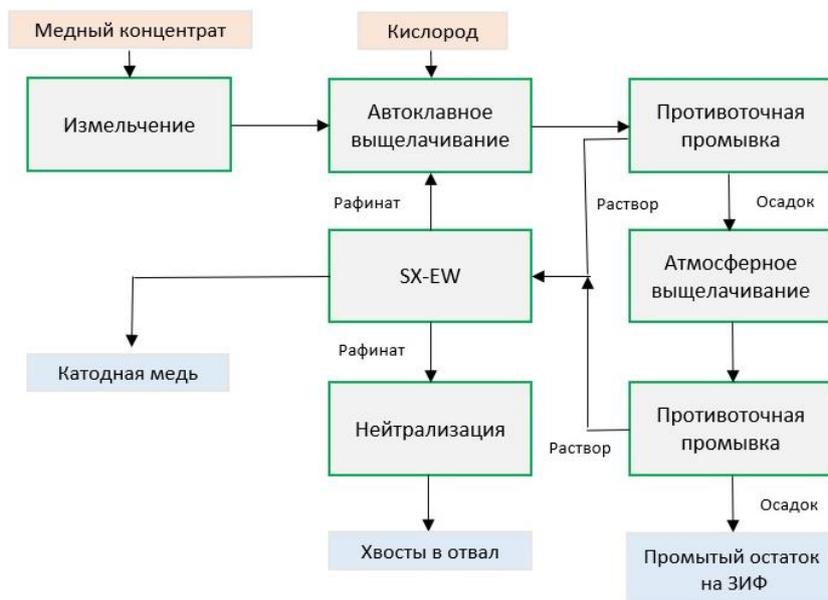


Рис. 4. Технологическая схема процесса CESL

Fig. 4. CESL process flow diagram

Помимо автоклавных технологий, существует ряд методов, не требующих высоких показателей температуры и/или давления, такие схемы объединены в группу под общим названием «технологии атмосферного выщелачивания». Например, с целью увеличе-

ния показателей извлечения меди (в частности, из халькопирита) были детально изучены и разработаны ряд технологических решений; к таким технологиям можно отнести: 1 – высокотемпературный процесс, разумно контролируемый в условиях атмосферного

давления (процесс BioCOP [28]); 2 – применение тонкого измельчения с целью увеличения реакционной способности материала без проявления пассивации (технологии VacTech/Mintek [29, 30]); 3 – использование действия специальных добавок (технология Galvanox [31]); 4 – применение инновационных комбинаций технологий переработки (процесс Geoscoat [32]), а также варианты технологических решений, таких как технологии HydroCopper [33], Intec Copper Process [34], Albion [35]. Стоит отметить, что вариант атмосферного окисления обладает более низкими капитальными и эксплуатационными затратами относительно автоклавных методов и биоокисления.

В результате анализа существующих вариантов и схем переработки было принято решение о более по-

дробном изучении последнего из упомянутых ранее вариантов (процесс Альбион). Данная технология, разработанная в 1994 г. [36], нетребовательна к составу используемого сырья, что делает переработку низкосортных медных концентратов рентабельным процессом (технологическая схема приведена на рис. 5). Помимо этого, преимуществом данной технологии также является низкая капиталозатратность относительно автоклавных способов переработки. В связи с этим в дальнейшем будет проведён ряд лабораторных опытов с целью определения целесообразности применения данной технологии, а также достижения желаемых результатов при использовании выбранной схемы переработки медных концентратов с высоким содержанием цинка.

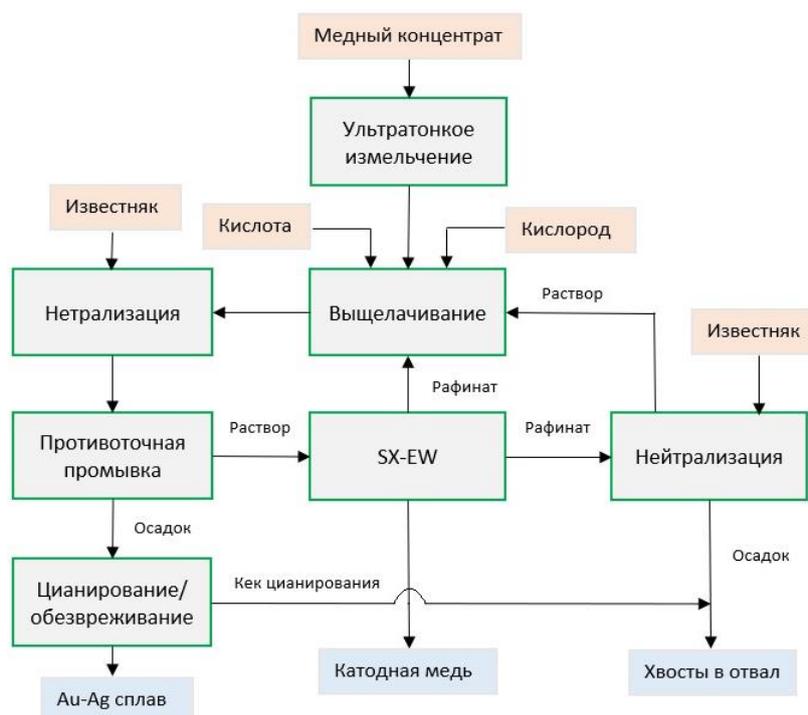


Рис. 5. Технологическая схема процесса Albion

Fig. 5. Albion process flow diagram

Как было отмечено ранее, переработку сложного по составу мультикомпонентного сырья важно осуществлять таким образом, чтобы достичь как можно большего извлечения всех ценных компонентов, при этом на текущий момент показатели комплексности переработки применяемых методов далеки от рациональных. Одним из вариантов решения данного вопроса является проведение операций гидрометаллургического кондиционирования. Разработка технологии по кондиционированию низкосортных цинксо­дер­жащих медных концентратов, гарантирующей как улучшение качества, так и получение дополнительной продукции (основа которой представлена цинком) с высокой добавочной стоимостью, позволит в максимальной степени уменьшить потери меди и цинка, повысить уровень сорта некондиционного медного концентрата до товарного, а также осуществить выпуск дополнительной товарной продукции – цинко-

вый концентрат. Так, ожидается, что при проведении сернокислотного высокотемпературного атмосферного выщелачивания медного концентрата с высоким содержанием цинка в непрерывном режиме показатели извлечения меди и цинка будут достигать уровня ~90 %. Таким образом, всё вышперечисленное позволит минимизировать потери ценных компонентов, оптимизировать операции дальнейшей переработки, достичь лучших показателей извлечения и, как следствие, увеличить прирост денежного потока.

Заключение

На текущий момент удовлетворение растущего спроса на цветные металлы в России в большинстве своём осуществляется за счёт роста объёмов добычи руды (всё больше в отработку вовлекаются месторождения с неблагоприятными горнотехническими условиями: малой мощностью, сложной геометрией и

невыдержанностью рудных тел, а также низким содержанием полезного компонента в рудах) вместо внедрения усовершенствованных технологий её глубокой переработки, а также разработки последующих комплексных схем извлечения ценных компонентов из концентратов. По этой причине свыше 90 % добытых руд (в том числе медно-колчеданных) всё ещё направляются в хвостохранилища, несмотря на содержание в этих отвалах, помимо вредных составляющих, ценных компонентов, редких элементов и благородных металлов. В связи с этим крайне актуальным является вопрос поиска и изучения вариантов комплексной переработки таких мультикомпонентных и сложнообогатимых материалов.

В настоящий момент запасы богатых и рядовых руд истощаются, вследствие чего в большей мере прибегают к эксплуатации месторождений с низкими содержаниями полезных компонентов [20, 37, 38]. Около половины меди, существенная доля серебра и почти весь цинк, кадмий и индий добываются в России из руд колчеданных месторождений, из которых также попутно извлекают золото, никель, кобальт и другие полезные компоненты [12].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году». – М.: Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, 2021. – 568 с.
2. Пешков А.М. Обоснование требований к качеству руд и техногенного сырья при комплексном освоении медно-колчеданных месторождений Урала: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2014. – 160 с.
3. Горнодобывающая промышленность. URL: https://www.ugmk.com/activity/primary_production/gornodobyvayushchaya-promyshlennost/ (дата обращения: 09.09.2022).
4. Баранников А.Г. Поиски и разведка ведущих геолого-промышленных типов месторождений полезных ископаемых. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2011. – 183 с.
5. ФБУ «Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых». Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Медные руды. – М.: ФГУ ГКЗ, 2007. – 40 с.
6. Кривцов А.И., Клименко Н.Г. Минеральное сырье. Медь: справочник. – М.: Геоинформмарк, 1997. – 52 с.
7. Быховер Н.А. Распределение мировых ресурсов минерального сырья по эпохам рудообразования. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1984. – 576 с.
8. Опыт освоения месторождений медно-порфирирового типа на Урале / И.А. Алтушкин, В.В. Левин, А.В. Сизиков, Ю.А. Король // Записки Горного института. – 2017. – Т. 228. – С. 641–648.
9. Контарь Е.С. Геолого-промышленные типы месторождений меди, цинка, свинца на Урале (геологические условия размещения, история формирования, перспективы): научная монография. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2013. – 199 с.
10. Опекунов А.Ю., Опекунова М.Г. Геохимия техногенеза в районе разработки Сибайского медно-колчеданного месторождения // Записки Горного института. – 2013. – Т. 203. – С. 196–204.
11. Родное рудное сердце Башкирии – Учалинский ГОК. URL: <https://mkset.ru/article/general/01-04-2021/rodnoe-rudnoe-serdtse-bashkirii-uchalinskiy-gok> (дата обращения: 09.09.2022).
12. Детализация морфологии рудной залежи Ново-Учалинского колчеданного месторождения (Южный Урал) / А.В. Спирина, В.В. Макаров, И.Б. Моисеев, И.В. Викентьев // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2020. – Т. 63. – № 2. – С. 35–46.
13. Александрова Т.Н., Ушаков Е.К., Орлова А.В. Метод типизации медно-цинковых руд сложного состава с применением

Вовлечение в переработку материалов со всё более низкими содержаниями полезных компонентов становится неизбежным с каждым годом. В частности, один из ярких примеров такого комплексного сырья – колчеданные медно-цинковые руды, являющиеся одним из основных источников получения медных и цинковых концентратов. Предмет выбора и разработки технологии их обогащения и переработки с высокими выходными показателями является крайне затруднительным и требующим поиска рационального комплексного решения [38].

В 2021 г. Главгосэкспертизой России было выдано положительное заключение по проекту отработки запасов руды Ново-Учалинского месторождения (с балансовыми запасами порядка 116 млн т) подземным способом. Предполагаемый объем добычи после окончания всех разработок и выхода на полную мощность составит 4,5 млн т руды в год. Предприятие специализируется на добыче и переработке медно-колчеданных руд и последующем получении цинкового, медного и пиритного концентратов. УГОК осуществляет добычу руд на Узельгинском, Учалинском, Ново-Учалинском, Озёрном, Западно-Озёрном, Молдёмном и Талганском месторождениях [39].

- нейросетевых моделей // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 5. – С. 140–147.
14. Пирожок П.И. Геологическое строение, зональность и генезис Новоучалинского колчеданного месторождения (Южный Урал) // Известия УГТУ. – 2016. – Т. 43. – № 3. – С. 7–12.
15. Совершенствование техники и технологии на Учалинской обогатительной фабрике в период 2000–2008 гг. / И.А. Абдрахманов, Р.А. Ягудин, А.В. Зимин, М.А. Арустамян, Е.П. Калинин // Горный журнал. – 2008. – № 1. – С. 78–82.
16. Прокин В.А., Буслав Ф.П., Исмагилов М.И. Медноколчеданные месторождения Урала. Геологическое строение. – Свердловск: УрО АН СССР, 1988. – 248 с.
17. УГОК. Основное производство. Обогатительная фабрика. URL: https://www.ugok.ru/ru/activity/primary_production/obogatitel'naya-fabrika/ (дата обращения: 09.09.2022).
18. Kobylyanski A., Zhukova V., Grigoreva V., Boduen A.Ya. Recent technologies in selective removal of arsenic in copper ore processing. *Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2021. pp. 196–202.
19. Theoretical foundations and technological capabilities of hydrocarbonyl process of recovering copper from technogenic wastes / I.V. Fedoseev, M.S. Barkan, A.V. Kornev, A.S. Danilov // *Journal of Ecological Engineering*. – 2018. – V. 19 (5). – P. 33–37.
20. Аммиачно-автоклавная технология переработки низкокачественных концентратов флотационного обогащения медистых песчаников / А.Я. Бодуэн, С.Б. Фокина, Г.В. Петров, Ю.В. Андреев // Обогащение руд. – 2019. – № 2. – С. 33–38.
21. Пожидаева С.Д., Агеева Л.С., Иванов А.М. Сравнительная характеристика окисления цинка и олова с участием кислот при комнатных температурах // Записки Горного института. – 2019. – Т. 235. – С. 38–46.
22. Хайнасова Т.С. Факторы, влияющие на бактериально-химические процессы переработки сульфидных руд // Записки Горного института. – 2019. – Т. 235. – С. 47–54.
23. Two-stage leaching of copper-zinc concentrate containing tennantite / A.V. Artykova, V.S. Melamud, A.Ya. Boduen, A.G. Bulaev // *AGRITeCH-III-2020*. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – P. 548.
24. Зайцев П.В., Шнеерсон Я.М. Автоклавные переработки медьсодержащего сырья // Цветные металлы. – 2016. – № 4. – С. 26–31.
25. Sinisalo P., Lundström M. Refining approaches in the platinum group metal processing value chain – a review // *Metals*. – 2018. – V. 8 (4). – P. 1–12.

26. Wieszczycka K. Wastes generated by mineral extraction industries // Physical Sciences Reviews. – 2018. – V. 3 (6). – P. 1–22.
27. Weidenbach M., Dunn G., Yong Yong Teo. Removal of impurities from copper sulfide mineral concentrates // ALTA 7th Nickel-Cobalt-Copper Conference. – Perth, Australia, 2016. – P. 335–351.
28. Batty J.D., Rorke G.V. Development and commercial demonstration of the BioCOP™ thermophile process // Hydrometallurgy. – 2006. – V. 83. – P. 83–89.
29. Van Staden P.J. The Mintek/Bactech copper bioleach process // ALTA 1998 Copper Sulphides Symposium. – Brisbane: ALTA Metallurgical Services, 1998. – P. 507–520.
30. Gericke M., Neale J.W., Van Staden P.J. Mintek perspective of the past 25 years in minerals bioleaching // J. South. Afr. Inst. Min. Metall. – 2009. – V. 109. – P. 567–585.
31. Dixon D.G., Mayne D.D., Baxter K.G. Galvanox™ – a novel galvanically assisted atmospheric leaching technology for copper concentrates // Canadian Metallurgical Quarterly. – 2008. – V. 47 (3). – P. 327–336.
32. Harvey T.J., Bath M. The GeoBiotics GEOCOAT Technology – Progress and Challenges // Biomining / Eds. D.E. Rawlings, D.B. Johnson. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. – P. 97–112.
33. Dissolution of six sulfide concentrates in the Hydrocopper environment / M. Lundström, J. Lipo, J. Karonen, J. Aromaa // The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Base Metals Conference. – Botswana, 2009. – P. 127–138.
34. Sammut D., Welham N.J. The Intec copper process: a detailed environmental analysis // Green Processing. – Cairns, QLD, 29–31 May 2002. – P. 115–124.
35. Albion process. Simplicity in leaching. Introduction to the Albion process // Albion Process™ Simplicity in leaching. URL: <https://www.albionprocess.com/en/Pages/home.aspx> (дата обращения: 09.09.2022).
36. Houn M., Turner D.W. Commercialisation of Albion process // Nickel-Cobalt-Copper, Uranium & Gold Conference. – Perth, Australia, 2012. – P. 231–248.
37. Обзор современных технологий переработки упорных золото-содержащих руд и концентратов с применением азотной кислоты / Д.В. Гордеев, Г.В. Петров, А.В. Хасанов, О.В. Северинова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 1. – С. 214–224.
38. Бодуэн А.Я., Иванов Б.С., Коновалов Г.В. Влияние повышения качества медных концентратов на эффективность их переработки // Записки Горного института. – 2011. – Т. 192. – С. 46–48.
39. Главгосэкспертиза одобрила проект отработки Ново-Учалинского рудника в Башкирии. URL: <https://gge.ru/press-center/news/glavgosekspertiza-odobrila-proekt-otrabotki-novo-uchalinskogo-rudnika-v-bashkirii/> (дата обращения: 09.09.2022).

Поступила: 22.11.2022 г.

Прошла рецензирование: 07.12.2022 г.

Информация об авторах

Васильева А.А., аспирант кафедры металлургии, Санкт-Петербургский Горный университет.

Бодуэн А.Я., кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии, Санкт-Петербургский Горный университет.

UDC 669.02.09

MINERALOGICAL FEATURES AND PROCESSING OF COPPER ZINC-CONTAINING CONCENTRATES (UCHALINSKY MINING AND PROCESSING PLANT)

Anna A. Vasileva¹,
fml0914@mail.ru

Anna Ya. Boduen¹,
Boduen_aya@pers.spmi.ru

¹ Saint-Petersburg Mining University,
2, 21st Line, Saint-Petersburg, 199106, Russia.

Relevance. Copper-pyrite ores of Russia are the basis of the mineral resource base of the country's metallurgical industry, primarily providing copper and zinc, and metals such as Pb, Au, Ag, etc. Today, about 25 % of the total balance reserves of zinc of the country is in the composition of copper pyrite ores, the role of the main component in which is performed by copper. The result of the flotation enrichment of copper pyrite ores is the production of substandard copper concentrates (Cu content ~15–20 %, Zn content ≥5 %). The pyrometallurgical processing of such materials into blister copper is characterized by high costs, as well as irretrievable losses of valuable components. Today, the issues of studying the characteristics of raw materials and deposits, developing technologies for processing copper- and zinc-containing materials, as well as analyzing existing and promising processing options are relevant and, as a result, can have positive effect both in terms of the complexity of using raw materials, improving the quality of the resulting products and the degree of their extraction, and, consequently, from an economic point of view.

The aim: analysis of the characteristics of copper zinc-bearing ores, in particular, the ores of the Uchalinsky and Verkhneursky copper ore regions enriched at the Uchalinsky mining and processing plant, mineralogical assessment of the concentrates of the Uchalinsky mining and processing plant, followed by the selection of promising options for processing low-grade copper concentrates based on hydro-metallurgical processing methods.

Methods. The analysis of data on the main types of copper deposits, the characteristics of copper pyrite ores in Russia, as well as more detailed data on ores enriched at the mining and processing plant was carried out on the basis of a review of domestic and foreign literary and information sources. Also, an analysis of the concentrate and middlings of the Uchalinsky mining and processing plant was carried out. Due to the information obtained through the combination of the above methods, an assessment was made and information on possible options for improving the processing technologies of the studied raw materials was presented.

Results. Thanks to the study and development of more integrated approaches in processing materials with a low content of useful components and complex raw materials, in particular, studied in this work, in the future it will be possible to achieve improved technological performance from both an economic and environmental point of view. In this paper, the raw materials and products used and obtained, respectively, at the Uchalinsky mining and processing plant, the Republic of Bashkiria, will be considered in more detail.

Key words:

copper concentrates, hydrometallurgical conditioning, atmospheric leaching, sulphide raw material, autoclave oxidation, mechanical activation.

REFERENCES

1. Gosudarstvenny doklad «O sostoyanii i ispolzovanii mineralno-syrevykh resursov Rossiyskoy Federatsii v 2020 godu» [State report «On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2020»]. Moscow, Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation Publ., 2021. 568 p.
2. Peshkov A.M. *Obosnovanie trebovaniy k kachestvu rud i tekhnogennogo syr'ya pri kompleksnom osvoenii medno-kolchedannykh mestorozhdeniy Urala*. Diss. Kand. nauk [Substantiation of requirements for the quality of ores and technogenic raw materials in the complex development of copper pyrite deposits in the Urals. Cand. Diss.] Moscow, 2014. 160 p.
3. *Gornodobyvayushchaya promyshlennost* [Mining Industry]. Available at: https://www.ugmk.com/activity/primary_production/gornodobyvayushchaya-promyshlennost/ (accessed 9 September 2022).
4. Barannikov A.G. *Poiski i razvedka vedushchikh geologo-promyshlennykh tipov mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh* [Search and exploration of leading geological and industrial types of mineral deposits]. Ekaterinburg, USMU Publ., 2011. 183 p.
5. FBU «Gosudarstvennaya komissiya po zapasam poleznykh iskopaemykh». *Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu Klassifikatsii zapasov mestorozhdeniy i prognoznykh resursov tverdykh poleznykh iskopaemykh. Mednye rudy* [Guidelines for the application of the classification of deposits and inferred resources of solid minerals. Copper ores]. Moscow, Federal State Institution «State Commission for Mineral Reserves» Publ., 2007. 40 p.
6. Krivtsov A.I., Klimenko N.G. *Mineralnoe syr'e. Med: spravochnik* [Mineral raw materials. Copper: handbook]. Moscow, Geoinformmark Publ., 1997. 52 p.
7. Bykhover N.A. *Raspredelenie mirovykh resursov mineralnogo syr'ya po epokham rudoobrazovaniya* [Distribution of world resources of mineral raw materials by epochs of ore formation]. 2nd ed. Moscow, Nedra Publ., 1984. 576 p.
8. Altushkin I.A., Levin V.V., Sizikov A.V., Korol Yu.A. Experience in the development of porphyry copper deposits in the Urals. *Journal of Mining Institute*, 2017, vol. 228, pp. 641–648. In Rus.
9. Kontar E.S. *Geologo-promyshlennyye tipy mestorozhdeniy medi, tsinka, svintsna na Urale (geologicheskie usloviya razmeshcheniya, istoriya formirovaniya, perspektivy): nauchnaya monografiya* [Geological and industrial types of deposits of copper, zinc, lead in the Urals (geological conditions of location, history of formation, prospects): scientific monograph]. Ekaterinburg, USMU Publ., 2013. 199 p.
10. Opekunov A.Yu., Opekunova M.G. Geochemistry of technogenesis in the area of development of the Sibay copper-pyrite deposit. *Journal of Mining Institute*, 2013, vol. 203, pp. 196–204. In Rus.
11. *Rodnoe rudnoe serdtse Bashkirii – Uchalinskiy GOK* [Native ore heart of Bashkiria – Uchalinsky plant]. Available at: <https://mkset.ru/article/general/01-04-2021/rodnoe-rudnoe-serdtse-bashkirii-uchalinskiy-gok> (accessed 9 September 2022).
12. Cpirina A.V., Makarov V.V., Moiseev I.B., Vikentev I.V. Detailing the morphology of the ore deposit of the Novo-Uchalinskoe pyrite deposit (Southern Urals). *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*, 2020, vol. 63, no. 2, pp. 35–46. In Rus.

13. Aleksandrova T.N., Ushakov E.K., Orlova A.V. Method of typing of copper-zinc ores of complex composition using neural network models. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2020, no. 5, pp. 140–147. In Rus.
14. Pirozhok P.I. Geological structure, zonality and genesis of the Novouchalinsky sulfide deposit (Southern Urals). *News of the Ural State Mining University*, 2016, vol. 43, no. 3, pp. 7–12. In Rus.
15. Abdrakhmanov I.A., Yagudin R.A., Zimin A.V., Arustamyan M.A., Kalinin E.P. Improvement of equipment and technology at the Uchalinsky enrichment plant in the period 2000–2008. *Mining Journal*, 2008, no. 1, pp. 78–82. In Rus.
16. Prokin V.A., Buslaev F.P., Ismagilov M.I. *Mednokolchedamnye mestorozhdeniya Urala. Geologicheskoe stroenie* [Copper pyrite deposits in the Urals. Geological structure]. Sverdlovsk, UrO AN SSSR Publ., 1988. 248 p.
17. UGOK. *Osnovnoe proizvodstvo. Obogatitel'naya fabrika* [Uchalinsky GOK. Primary production. Enrichment enterprise]. Available at: https://www.ugok.ru/ru/activity/primary_production/obogatitel'naya-fabrika/ (accessed 9 September 2022).
18. Kobylanski A., Zhukova V., Grigoreva V., Boduen A.Ya. Recent technologies in selective removal of arsenic in copper ore processing. *Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2021. pp. 196–202.
19. Fedoseev I.V., Barkan M.S., Kornev A.V., Danilov A.S. Theoretical foundations and technological capabilities of hydrocarbonyl process of recovering copper from technogenic wastes. *Journal of Ecological Engineering*, 2018, vol. 19 (5), pp. 33–37.
20. Boduen A., Fokina S., Petrov G., Andreev Yu. Ammonia autoclave technology for the processing of low-grade concentrates generated in flotation concentration of cupriferous sandstones. *Obogashchenie Rud*, 2019, vol. 2, pp. 33–38. In Rus.
21. Pozhidaeva S.D., Ageeva L.S., Ivanov A.M. Comparative characteristics of the oxidation of zinc and tin with the participation of acids at room temperatures. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 235, pp. 38–46. In Rus.
22. Khaynasova T.S. Actors affecting bacterial and chemical processes of processing sulfide ores. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 235, pp. 47–54. In Rus.
23. Artykova A.V., Melamud V.S., Boduen A.Ya., Bulaev A.G. Two-stage leaching of copper-zinc concentrate containing tennantite. *AGRITECH-III-2020. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2020, pp. 548.
24. Zaitsev P.V., Shneerson Ya.M. Autoclave processing of copper-containing raw materials. *Metals and Alloys*, 2016, no. 4, pp. 26–31. In Rus.
25. Sinisalo P., Lundström M. Refining approaches in the platinum group metal processing value chain – a review. *Metals*, 2018, vol. 8, no. 4, pp. 1–12.
26. Wieszczycka K. Wastes generated by mineral extraction industries. *Physical Sciences Reviews*, 2018, vol. 3, no. 6, pp. 1–22.
27. Weidenbach M., Dunn G., Yong Yong Teo. Removal of impurities from copper sulfide mineral concentrates. *ALTA 7th Nickel-Cobalt-Copper Conference*. Perth, Australia, 2016. pp. 335–351.
28. Batty J.D., Rorke G.V. Development and commercial demonstration of the BioCOP™ thermophile process. *Hydrometallurgy*, 2006, vol. 83, pp. 83–89.
29. Van Staden P.J. The Mintek/Bactech copper bioleach process. *ALTA 1998 Copper Sulphides Symposium*. Brisbane, ALTA Metallurgical Services, 1998. pp. 507–520.
30. Gericke M., Neale J.W., Van Staden P.J. Mintek perspective of the past 25 years in minerals bioleaching. *J. South. Afr. Inst. Min. Metall*, 2009, vol. 109, pp. 567–585.
31. Dixon D.G., Mayne D.D., Baxter K.G. Galvanox™ – a novel galvanically assisted atmospheric leaching technology for copper concentrates. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2008, vol. 47, no. 3, pp. 327–336.
32. Harvey T.J., Bath M. The GeoBiotics GEOCOAT Technology – Progress and Challenges. *BioMining*. Eds. D.E. Rawlings, D.B. Johnson. Berlin, Heidelberg, Springer, 2007. pp. 97–112.
33. Lundström M., Liipo J., Karonen J., Aromaa J. Dissolution of six sulfide concentrates in the Hydrocopper environment. *Base Metals Conference*. Botswana, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2009. pp. 127–138.
34. Sammut D., Welham N.J. The Intec copper process: a detailed environmental analysis. *Green Processing*. Cairns, QLD, 29–31 May 2002. pp. 115–124.
35. *Albion process. Simplicity in leaching. Introduction to the Albion Process*. Available at: <https://www.albionprocess.com/en/Pages/home.aspx> (accessed 9 September 2022)
36. Houn M., Turner D.W. Commercialisation of Albion Process. *Nickel-Cobalt-Copper, Uranium & Gold Conference*. Perth, Australia, 2012. pp. 231–248.
37. Gordeev D.V., Petrov G.V., Khasanov A.V., Severinova O.V. Review of modern processing technologies of refractory gold ores and concentrates with use of nitric acid. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 1, pp. 214–223. In Rus.
38. Boduyen A.Ya., Ivanov B.S., Konovalov G.V. The impact of improving the quality of copper concentrates on the efficiency of their processing. *Journal of Mining Institute*, 2011, vol. 192, pp. 46–48. In Rus.
39. *Glavgosekspertiza odobrila proekt otrabotki Novo-Uchalinskogo rudnika v Bashkirii* [The main state expertise approved the development project of the Novo-Uchalinsky mine in Bashkiria]. Available at: <https://gge.ru/press-center/news/glavgosekspertiza-odobrila-proekt-otrabotki-novo-uchalinskogo-rudnika-v-bashkirii/> (accessed 9 September 2022).

Received: 22 November 2022.

Reviewed: 7 December 2022.

Information about the authors

Anna A. Vasileva, postgraduate student, Saint-Petersburg Mining University.

Anna Ya. Boduen, Cand. Sc., assistant professor, Saint-Petersburg Mining University.