

ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ / MINERAL PROCESSING

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.76>

ИЗУЧЕНИЕ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА И ПЕРСПЕКТИВНОСТЬ ФЛОТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ РУДЫ РАИСИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Научная статья

Коннова Н.И.^{1,*}, Гольсман Д.А.², Бакшеева И.И.³, Тарасов А.В.⁴² ORCID : 0000-0003-4399-6744;³ ORCID : 0000-0002-3838-7429;^{1,2,3} Сибирский Федеральный Университет, Красноярск, Российская Федерация⁴ ООО «Экосупервайзер», Красноярск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (kni757[at]mail.ru)

Аннотация

Изучен вещественный состав двух проб руды Раисинского месторождения. Определено, что содержание меди в пробах 1 и 2 невысокое – 0,43 и 0,57%, массовая доля серебра составляет 7,1-7,2 и 13,8-14,2, золота – менее 0,1 г/т, содержание серы низкое и составляет 0,17 и 0,76% соответственно. Из цветных металлов в незначительных количествах присутствует цинк (0,015 и 0,025%), свинец (менее 0,002% в обеих пробах), кобальт (менее 0,005% в обеих пробах) и кадмий (0,015 и 0,031%).

Пробы руды имеют сравнительно несложный минеральный состав: существенно преобладают породообразующие минералы, представленные кварцем, кальцитом, доломитом, альбитом, ортоклазом и мусковитом. Количество первичных минералов меди (халькозин и др.) – до 2-4, пирита – менее 0,5% соответственно.

Выполнены исследования по получению флотационных концентратов. Из лабораторной пробы 1 получен флотационный концентрат марки КМ4, из пробы 2 – КМ7. Полученные концентраты по содержанию основных компонентов и вредных примесей соответствуют требованиям ГОСТ Р52998-2008 «Концентрат медный. Технические условия (с поправкой)».

Ключевые слова: медная руда, концентрат, пенный продукт, камерный продукт, флотация, реагенты, извлечение, обогащение.

A STUDY OF THE MATERIAL COMPOSITION AND THE FEASIBILITY OF FLOTATION PROCESSING OF ORE FROM THE RAISINSKOYE DEPOSIT

Research article

Konnova N.I.^{1,*}, Golsman D.A.², Baksheeva I.I.³, Tarasov A.V.⁴² ORCID : 0000-0003-4399-6744;³ ORCID : 0000-0002-3838-7429;^{1,2,3} Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation⁴ LLC "Ecosupervisor", Krasnoyarsk, Russian Federation

* Corresponding author (kni757[at]mail.ru)

Abstract

The material composition of two samples of ore from the Raisinskoe deposit was studied. It has been determined that copper content in samples 1 and 2 is low – 0.43 and 0.57%, mass fraction of silver is 7.1-7.2 and 13.8-14.2, gold – less than 0.1 g/t, sulfur content is low – 0.17 and 0.76% respectively. Of the base metals, zinc (0.015 and 0.025%), lead (less than 0.002% in both samples), cobalt (less than 0.005% in both samples) and cadmium (0.015 and 0.031%) are present in minor amounts.

Ore samples have a relatively simple mineral composition: rock-forming minerals represented by quartz, calcite, dolomite, albite, orthoclase and muscovite predominate considerably. The amount of primary copper minerals (chalcocite etc.) is up to 2-4, pyrite less than 0.5% respectively.

Studies on the production of flotation concentrates were carried out. Flotation concentrate of KM4 grade was obtained from laboratory sample 1 and KM7 from sample 2. The concentrates obtained meet the requirements of GOST R52998-2008 "Copper Concentrate. Technical Conditions (as amended)".

Keywords: copper ore, concentrate, froth product, flotation tail, reagents, recovery, processing.

Введение

Раисинское месторождение располагается в центральной части Печищенской группы медных месторождений, расположенной в Шарыповском районе Красноярского края и приуроченной к стыку северо-восточных отрогов Кузнецкого Алатау с юго-западной окраиной Салбатской мульды Северо-Минусинской впадины.

Печищенская группа месторождений, включающая Печищенское и Раисинское мелкие месторождения, Сарбагольское, Саройное, Козынгольское и Михайловское рудопроявления меди, известна ещё с глубокой древности и за последние 2,5 столетия, с 70-х годов 18-го века, трижды являлась предметом добычи меди. Медная руда добывалась в открытых карьерах вручную и переплавлялась на медеплавильных заводах, построенных тут же, в долине реки Верхняя Печище. За это время были добыты тысячи пудов меди, в один только 1881 год из последнего периода добычи (с 1870 по 1882 гг.), по данным архивных источников, было добыто до 700 пудов (почти 8,5 т) меди [1].

В советское время запасы меди по Печищенскому и Раисинскому месторождениям оценивались в 30-х годах 20-го века. Тогда эти месторождения были признаны непромышленными и на 80 лет были забыты.

Печище-Раисинская площадь с давних времен привлекала внимание исследователей наличием благороднометалльно-медного оруденения. В настоящее время площадь рудного поля считается перспективной на выявление промышленных месторождений меди с попутным серебром.

В 2018 г. месторождениями Печищенской группы заинтересовалось ООО «Тигирголь» (г. Красноярск) и, получив лицензию и, изыскав инвесторов, приступило к поисково-оценочным работам на медь [1].

В процессе этих работ было выяснено, что руды Раисинского месторождения локализованы в туфогенно-осадочных нижнедевонских отложениях, являются малосульфидными, по качеству руды бедными – содержание меди в пробах варьирует от менее 0,1% до 1,5-2%, редко более. Также выяснилось, что помимо меди руды содержат в небольших количествах серебро (от первых до десятков г/т), из цветных металлов в незначительных количествах присутствуют цинк (до 0,035%), свинец (до 0,03-0,10%), кобальт (до 0,008%), кадмий (до 0,033-0,071%) и молибден (до 0,035-0,19%), сера содержится тоже в небольших количествах (до 1,3-1,7%). В связи с этим встал вопрос об изучении возможности комплексного извлечения полезных компонентов – меди и серебра – из руд. Было очевидно, что наличие серебра в рудах повышает их промышленную ценность [1].

Методы и принципы исследования

Настоящие исследования проводились в Сибирском федеральном университете.

Определено, что содержание меди в пробах 1 и 2 невысокое и равно 0,43 и 0,57% соответственно. Массовая доля серебра составляет 7,1-7,2 и 13,8-14,2, золота – менее 0,1 г/т соответственно. Содержание серы низкое и составляет 0,17 и 0,76% соответственно. Из цветных металлов в незначительных количествах присутствует цинк (0,015 и 0,025%), свинец (менее 0,002% в обеих пробах), кобальт (менее 0,005% в обеих пробах) и кадмий (0,015 и 0,031%). Исследование химического состава проводили согласно [2], [4], [5], [7].

Оптические исследования выполнены в отражённом свете с использованием микроскопа Axioscop 40-APol, оптическое увеличение до 1000x (ZEISS, ФРГ). По результатам бинокулярного изучения исходный материал проб представлен частицами размером 0,005-0,2 мм (преобладающий размер 0,01-0,02 мм).

Результаты рентгенофазового анализа исходных проб руды по данным Центра коллективного пользования СФУ представлены в табл. 1.

Таблица 1 - Фазовый состав проб исходной руды

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.76.1>

Проба	Содержание минерала, %									
	Кварц	Кальцит	Доломит	Альбит	Ортоклаз	Мусковит	Рутил	Пирит	Халькопирит	Лангит
1	28,6	19,5	н/о	30,7	17,6	3,25	н/о	0,21	н/о	н/о
2	24,1	13,9	2,96	38,8	16,9	2,74	н/о	0,48	н/о	н/о

Дифрактограммы исходной руды проб по данным Центра коллективного пользования СФУ представлены на рис. 1 и 2.

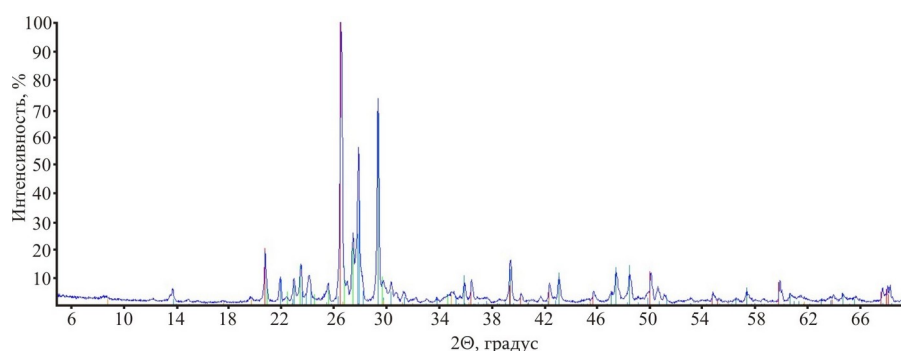


Рисунок 1 - Дифрактограмма исходной руды пробы 1

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.76.2>

Примечание: по данным ЦКП СФУ

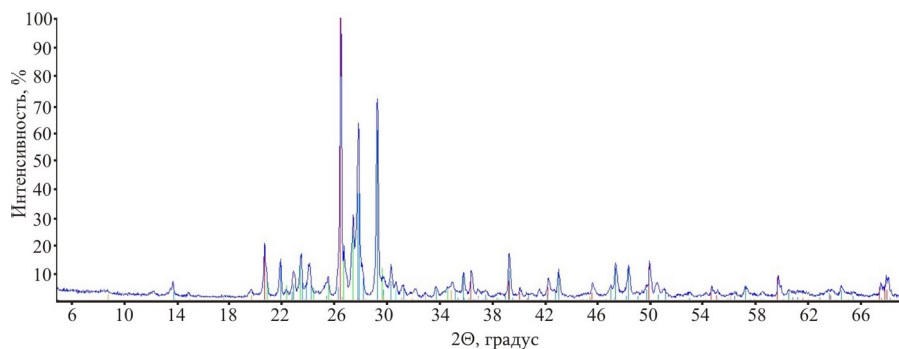


Рисунок 2 - Дифрактограмма исходной руды пробы 2
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.76.3>

Примечание: по данным ЦКП СФУ

Для уточнения состава минералов и диагностики трудно распознаваемых минеральных фаз дополнительно применялось электронно-микроскопическое исследование на сканирующем электронном микроскопе Hitachi TM-3000 (пр-во Японии).

Пробы руды имеют сравнительно несложный минеральный состав: существенно преобладают породообразующие минералы, представленные кварцем, кальцитом, доломитом, альбитом, ортоклазом и мусковитом. Количество первичных минералов меди (халькозин, халькопирит, борнит) – до 2-4, пирита – менее 0,5% соответственно.

Из вторичных минералов установлены редкие зёрна карбонатов меди (азурит и малахит), ковеллина, куприта, гидроокислы железа и лангит, установленный по результатам рентгенофазового анализа и подтверждённый электронно-микроскопическим (микрорентгено-спектральным) анализом [6].

Халькозин – образует достаточно густую вкрапленность ксеноморфных агрегатов размером до 2,0х2,8 мм, располагающихся, в основном, в составе цемента породы и содержащих внутри себя большое количество включений обломков породы (рис. 3). Кроме этого, халькозин образует вкрапленность мелких зерен неправильной, формы, располагающихся на контактах обломков пород.

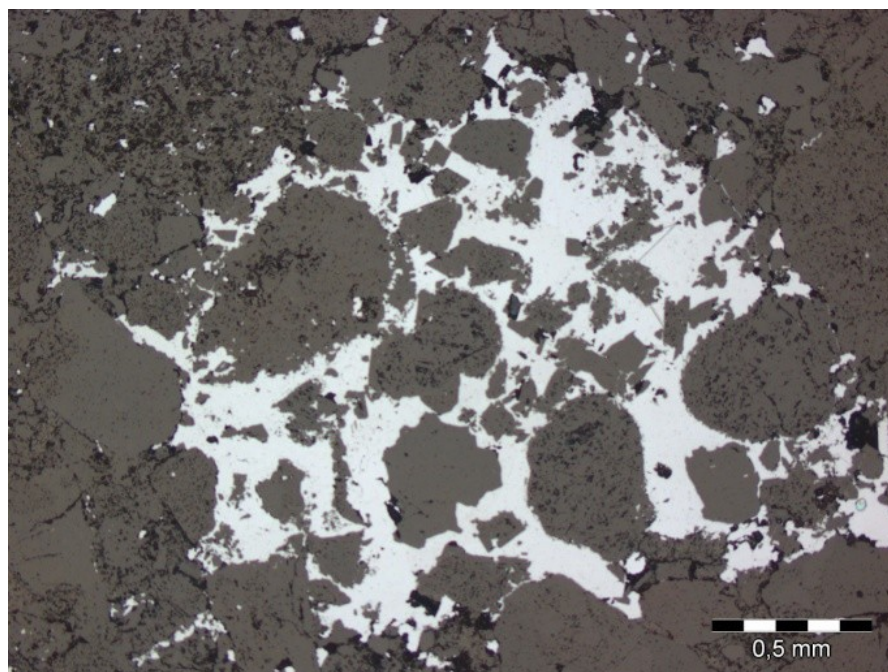


Рисунок 3 - Агрегат халькозина
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.76.4>

По краям агрегатов халькозина развиваются каймы куприта (рис. 4) и ксеноморфные зерна сфалерита. В качестве включений постоянно отмечаются линзовидные зерна рутила (лейкоксена). Значительно меньше в халькозине встречаются мелкие зерна самородного серебра (рис. 6).

Халькопирит – образует разнообразные прожилки в породе или волосовидные прожилки по трещинам пирита. В составе породы прожилки прерывистые, часто имеют двойное строение. Толщина их варьирует от менее 0,5 до 7-8 мкм. Длина может достигать 0,35 мм. Кроме прожилков, халькопирит часто образует отдельные зерна или небольшие

агрегаты, обрастающие обломки породы. Мелкие зерна халькопирита отмечаются не только в цементе породы, но и внутри обломочного материала.

Борнит – отмечается в тесном сростании с халькопиритом, с которым образует характерную решетчатую структуру распада твердого раствора. Агрегаты гипогенного борнита и халькопирита образуют совместные сростания размером до 0,2х0,7 мм. Эти сростки могут создавать самостоятельные выделения и встречаться внутри агрегатов пирита, блеклой руды.

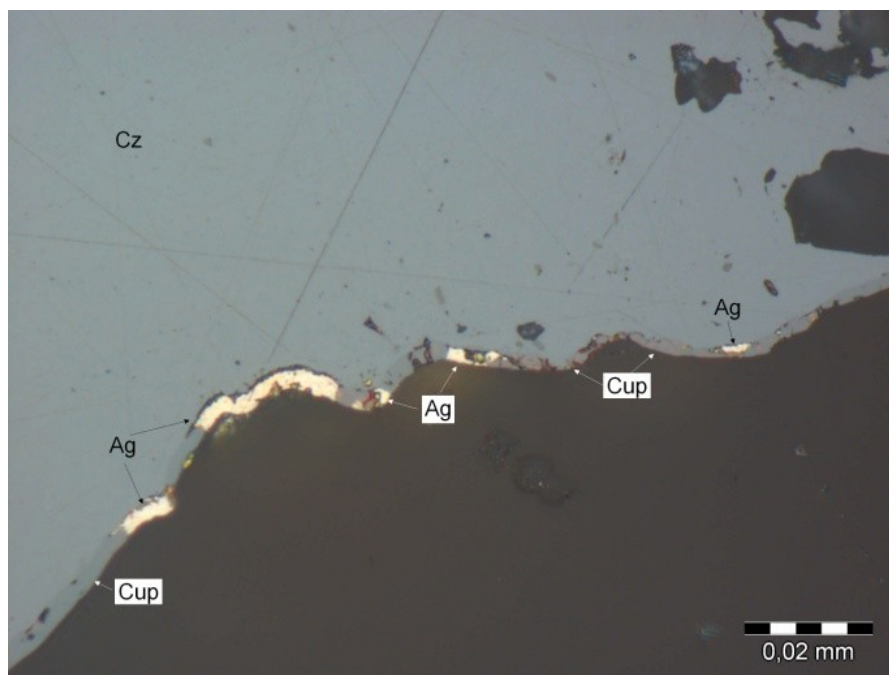


Рисунок 4 - Куприт и серебро по халькозину
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.76.5>

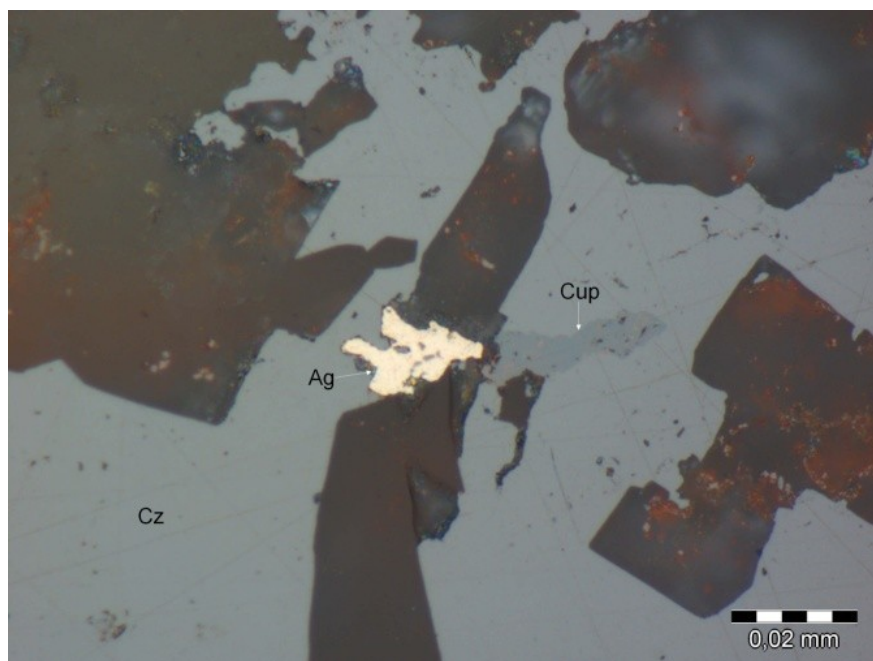


Рисунок 5 - Куприт и серебро в халькозине
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.76.6>

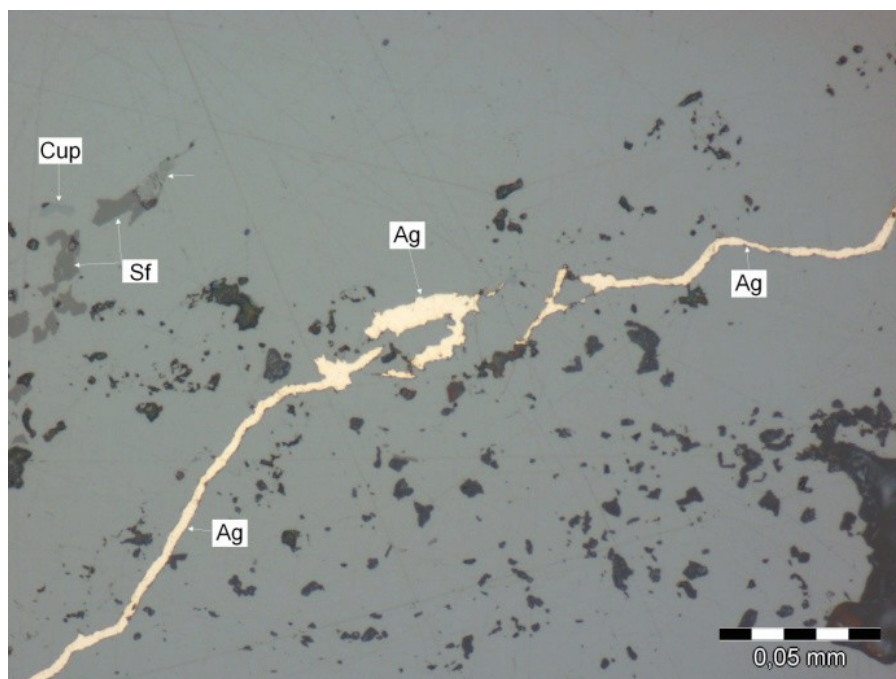


Рисунок 6 - Прожилки серебра в халькозине
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.76.7>

Малахит образует многочисленные тонкие (2-8 мкм) прожилки, секущие цемент породы и развивающиеся вдоль границ обломков.

Ковеллин представлен небольшими (не более 0,08x0,08 мм) сростками и отдельными пластинчатыми зернами, замещающими халькозин. В целом, количество ковеллина ограничивается несколькими десятками зерен.

Куприт активно замещает халькозин, образуя по его краям тонкие, размером 3-5 мкм, прерывистые каймы, проникает внутрь халькозина и замещает последний со стороны различных его включений. Форма зерен и агрегатов куприта сложная, неправильная. Каймы куприта по халькозину сопровождаются зернами или тонкими прожилками самородного серебра. В редких случаях в составе кайм куприта содержатся микронные выделения самородной меди.

Самородное серебро распространено либо внутри агрегатов халькозина, либо по его краям. Зерна мелкие от 0,5x1,0 мкм до миллиметра, а толщина прожилков редко превышает 3-4 мкм. Основная масса зерен и прожилков самородного серебра приурочена к каймам или выделениям куприта (рис. 8-9).

Самородная медь встречается редко. Минерал обнаружен в составе каймы куприта, замещающего халькозин. Размеры зерен самородной меди – от 0,5x0,5 мкм до 0,008x0,01 мм.

Состав изученных проб, в целом, схож с составом руд месторождений меди и серебра в Чили (Эль-Солдадо, Мантос Бланкос и др.), а также в Иране (Мари и др.). Это месторождения гидрогенного генезиса манто-типа, широко известного за рубежом, но почти не известного в России. В изучаемых пробах практически нет попутных компонентов, кроме серебра, в отличие от руд месторождений медистых песчаников (Джезказган, Удокан и др.), в которых много попутных компонентов (свинец, цинк, кобальт, молибден и др.).

На основании изучения вещественного состава проб руды Раисинского месторождения была изучена возможность получения флотационного концентрата и отвальных хвостов [3].

Дробление материала проб проводилось на щековой дробилке ДЛЩ 80x150 и валковой дробилке в замкнутом цикле с поверочным грохочением. Перемешивание (методом кольца и конуса) и сокращение дробленых материалов проводилось по стандартной методике с соблюдением минимально необходимой массы пробы.

Измельчение руды до крупности 85 % класса 0,071 – 0 мм проводилось в лабораторной шаровой мельнице объемом 0,007 м³ при отношении Т:Ж:Ш = 1:0,5:8. Рационарирование шаровой нагрузки представлено в табл. 2.

Таблица 2 - Рационарирование шаровой нагрузки

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.76.8>

Диаметр шаров, мм	Соотношение веса шаров, %
25	27,1
22	21,7
20	16,9
18	12,7
16	9,1
14	12,5

Флотационное обогащение проводилось в лабораторной флотационной машине 240 ФЛ.

Подготовка проб к анализам осуществлялась с помощью истирателя вибрационного чашевого ИВЧ-3 и лабораторных сит.

Учитывая результаты вещественного состава и небольшую массу поступивших на исследования проб руды, были выполнены тестовые исследования по флотационной схеме обогащения, включающей основную и контрольную операции.

За базовый в операции основной флотации был принят следующий оптимальный режим: расход соды – 500 г/т (до pH 8-8,5), Na₂S – 50 г/т, бутилового ксантогената калия – 50 г/т, Т-92 (оксаль) – 50 г/т, крупность питания – 85 % класса минус 0,071 мм, плотность – 30 % твердого.

Продолжительность основной флотации экспериментально уточнялась. Подача реагентов осуществлялась в камеру флотационной машины. Время перемешивания с реагентами составило, мин: с содой – 5, с Na₂S – 5, с бутиловым ксантогенатом калия – 2, с Т-92 – 1. В ходе работы с пробами руды при флотации наблюдалось формирование насыщенной сульфидами пены с характерным цветом.

Обсуждение и основные результаты

Результаты флотационного тестирования представлены в табл. 3.

Таблица 3 - Результаты основной флотации

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.76.9>

Наименование продукта	Выход, %	Массовая доля меди, %	Извлечение меди, %	№ пробы
Пенный	1,36	23,2	68,59	1
Камерный	98,64	0,14	31,41	
Исходная руда	100,00	0,458	100,00	
Пенный	4,27	12,2	86,82	2
Камерный	95,73	0,09	13,18	
Исходная руда	100,00	0,6	100,00	

Примечание: постоянные условия: сода – 500 г/т, Na₂S – 50 г/т, бутиловый ксантогенат калия – 50 г/т, Т-92 (оксаль) – 50 г/т.; плотность питания флотации – 30 % твердого, крупность питания – 85 % класса минус 0,071 мм, время флотации – 5-6 мин

По результатам основной флотации (табл. 3) установлено, что из пробы 1 исходной руды с массовой долей меди 0,458% при заданном реагентном режиме получен концентрат с содержанием меди 23,2% при выходе 1,36% и при извлечении 68,59%. Степень концентрации меди составила более 50 в одну операцию без перечистной флотации. Потери металла с хвостами основной флотации составили 31,41%.

Из пробы 2 исходной руды с массовой долей меди 0,6% при заданном реагентном режиме получен концентрат с содержанием меди 12,2% при выходе 4,27% и при извлечении 86,82%. Степень концентрации меди составила более 20 в одну операцию без перечистной флотации. Потери меди с хвостами основной флотации составили 13,18%.

С целью доизвлечения меди из хвостов основной флотации камерный продукт был подвергнут контрольной операции при следующем реагентном режиме: расход бутилового ксантогената калия – 35 г/т, Т-92 (оксаль) – 35 г/т.

Результаты контрольной флотации представлены в таблице 4, из которой видно, что контрольная флотация камерного продукта основной операции пробы 1 позволяет дополнительно извлечь 36,37% меди с массовой долей металла 2,46% при выходе 2,07%. Отвальные хвосты получены с содержанием 0,096% меди. Потери меди составляют 63,63 % от этой операции.

Контрольная флотация камерного продукта основной флотации пробы 2 позволяет дополнительно извлечь 36,62% меди с массовой долей меди 1,07% при выходе 3,08%. Отвальные хвосты получены с содержанием 0,058% меди при извлечении 63,38% от операции.

Таблица 4 - Результаты контрольной флотации

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.76.10>

Наименование продукта	Выход, %	Массовая доля меди, %	Извлечение меди, %	№ пробы
Пенный контрольной	2,07	2,46	36,37	1
Камерный контрольной	97,93	0,096	63,63	

Камерный основной флотации	100,00	0,14	100,00	
Пенный контрольной	3,08	1,07	36,62	2
Камерный контрольной	96,92	0,058	63,38	
Камерный основной флотации	100,00	0,09	100,00	

Примечание: постоянные условия: бутиловый ксантогенат калия – 35 г/т, Т-92 (оксаль) – 35 г/т, плотность питания флотации – 30 % твердого, крупность питания – 85 % класса минус 0,071 мм, время флотации – 6 мин

На основании выполненных исследований проведено обогащение руды по флотационной схеме обогащения, результаты флотации представлены в табл. 5. Исследования проводились по ранее выбранным постоянным условиям – крупности питания, плотности питания и расходу реагентов.

Таблица 5 - Результаты тестирования по флотационной схеме

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.76.11>

Наименование продукта	Выход, %	Массовая доля меди, %	Извлечение меди, %	№ пробы
Пенный основной флотации	1,36	23,2	68,59	1
Пенный контрольной флотации	2,04	2,46	10,91	
Камерный контрольной флотации	96,6	0,096	20,5	
Исходная руда	100,00	0,458	100,00	
Пенный основной флотации	4,27	12,2	86,82	2
Пенный контрольной флотации	2,95	1,07	5,26	
Камерный контрольной флотации	92,78	0,058	7,92	
Исходная руда	100,00	0,6	100,00	

Примечание: расход реагентов в основную операцию: сода – 500 г/т (до pH 8-8,5), Na₂S – 50 г/т, бутиловый ксантогенат калия – 50 г/т, Т-92 (оксаль) – 50 г/т; в контрольную операцию: бутиловый ксантогенат калия – 35 г/т, Т-92 (оксаль) – 35 г/т; плотность питания флотации – 30 % твердого

Таким образом, в лабораторных условиях проведены тестовые испытания проб флотационным методом обогащения при следующем оптимальном режиме:

- крупность питания – 85% класса 0,071-0 мм;
- плотность питания основной флотации – 30% твердого;
- расход реагентов на 1 т руды в основной флотации: соды – 500 г/т, Na₂S – 50 г/т, бутиловый ксантогенат калия – 50 г/т, Т-92 (оксаль) – 50 г/т; в контрольной флотации: бутиловый ксантогенат калия – 35 г/т, Т-92 (оксаль) – 35 г/т;
- время перемешивания с реагентами, в минутах: с содой – 5, с Na₂S – 5, ксантогенатом – 2, с Т-92 – 1;
- время основной флотации – 5-6, контрольной – 6 минут.

Показана возможность получения флотационных концентратов с содержанием меди 23,2 и 12,2% из руды пробы 1 и 2 при извлечении 68,59 и 86,82% соответственно. Хвосты основной флотации (камерный продукт) обеих проб

содержат от 0,09 до 0,14%, в среднем, 0,11% меди, потери меди в этой операции составляют 31,41 и 13,18% соответственно. Проведение контрольной флотации позволяет дополнительно извлечь 20,5 и 7,92% меди от исходной руды.

Получены пенные продукты контрольных операций, которые представляют интерес. Содержание меди в пенных продуктах контрольных операций составляет 2,46 и 1,07%. Целесообразно, в дальнейших исследованиях, эти продукты возвращать в основные операции или направлять в отдельные циклы.

В продуктах флотации наблюдается концентрация цветных металлов: цинка в 9-10 раз: 0,15 и 0,23; свинца в 14-19 раз: 0,14 и 0,19; кобальта в 3-10 раз: 0,0076 и 0,025; кадмия в 12-16 раз: 0,25 и 0,39 и молибдена в 10-14 раз: 0,072 и 0,27% соответственно. Кроме того, содержание серы также увеличилось в 23-60 раз – 10,36 и 17,8 %, что подтверждает концентрацию сульфидов в пенных продуктах.

Содержание серебра в хвостах флотации высокое и варьирует от 5,4 до 7,6 г/т для проб 1 и 2, что равно, соответственно, 76-80% и 54-55% от его содержания в исходных пробах. Содержание золота весьма низкое и составляет менее 0,1 г/т, как в исходных пробах, так и в продуктах обогащения.

Минералогические исследования продуктов обогащения показали следующие результаты. В таблицах 6 и 7 представлены результаты минераграфического и электронно-микроскопического анализов продуктов флотации проб 1 и 2.

Таблица 6 - Минеральный состав продуктов флотации пробы 1

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.76.12>

Продукт	Содержание минералов, %													Породообработка минералы
	Пирит	Халькопирит	Борнит	Халькозин	Ковеллин	Сфалерит	Галенит	Гринокит	Медь самородная	Куприт	Лимонит	Гематит	Рутил	
Пенный основной флотации	1,5	0,8	0,4	1,0	0,6	0,01	0,01	0,04	0,04	0,05	0,2	0,1	0,8	94,45
Пенный контрольной флотации	1,4	0,4	0,3	0,8	0,4	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	0,1	н/о	0,7	95,9
Камерный контрольной флотации	0,2	0,01	н/о	0,01	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	0,1	0,8	0,2	98,68

Примечание: по данным ЦКП СФУ; содержание приведённых минералов нормировано на 100%

Таблица 7 - Минеральный состав продуктов флотации пробы 2

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.76.13>

Продукт	Содержание минералов, %
---------	-------------------------

дукт	Пирит	Халькопирит	Борнит	Халькозин	Ковеллин	Сфалерит	Галенит	Гринокит	Медь самородная	Куприт	Лимонит	Гематит	Рутил	Породообр. минералы
Пенный основной флотации	15,8	7,2	5,3	8,6	6,7	0,05	0,03	0,06	0,1	0,2	2,9	0,2	0,5	52,36
Пенный контрольной флотации	5,5	1,1	0,4	0,8	0,4	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	0,8	н/о	0,3	90,7
Камерный контрольной флотации	0,2	0,01	н/о	н/о	0,01	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	0,2	0,9	0,4	98,28

Примечание: по данным ЦКП СФУ; содержание приведённых минералов нормировано на 100%

В камерных продуктах контрольной флотации (хвосты) сосредоточено основное количество породных минералов и незначительное – рудных.

Результаты рентгенофазового анализа исходных проб руды представлены в табл. 8 и 9.

Таблица 8 - Фазовый состав проб исходной руды 1

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.76.14>

Проба	Содержание минерала, %									
	Кварц	Кальцит	Доломит	Альбит	Ортоклаз	Мусковит	Рутил	Пирит	Халькопирит	Лангит
1	28,6	19,5	н/о	30,7	17,6	3,25	н/о	0,21	н/о	н/о
Пенный основной флотации	18,4	26,4	3,38	33,9	5,07	9,55	0,94	1,16	0,60	0,37
Пенный контрольной флотации	18,6	27,5	2,64	37,8	4,40	4,93	0,74	2,45	0,33	0,39

Камерный контрольный флотации	24,7	20,6	3,04	31,8	16,2	2,28	0,42	0,52	н/о	0,17
-------------------------------	------	------	------	------	------	------	------	------	-----	------

Примечание: по данным ЦКП СФУ

Дополнительно к рентгенофазовому анализу изучался химический состав исходных проб и продуктов обогащения по результатам рентгенфлюоресцентного анализа (табл.10 и 11).

Таблица 9 - Фазовый состав проб исходной руды 2

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.76.15>

Проба	Содержание минерала, %									
	Кварц	Кальцит	Доломит	Альбит	Ортоклаз	Мусковит	Рутил	Пирит	Халькопирит	Лангит
2	24,1	13,9	2,96	38,8	16,9	2,74	н/о	0,48	н/о	н/о
Пенный основной флотации	14,3	24,9	2,39	24,3	7,98	4,47	0,67	17,0	3,47	0,35
Пенный контрольный флотации	19,3	21,3	3,42	33,1	13,6	5,13	0,38	1,43	0,51	0,45
Камерный контрольный флотации	22,1	15,2	3,39	37,9	16,4	2,03	0,57	0,32	0,48(?)	0,30

Примечание: по данным ЦКП СФУ

Результаты рентгенфлюоресцентного анализа (волновой рентгенфлюоресцентный спектрометр Shimadzu XRF-1800) указывают на обогащённость исходного материала пробы 1 кремнием (20,14%), алюминием (6,47%), углеродом (4,82%), кальцием (9,83%), натрием (2,56%), калием (2,45%), железом (1,38%), менее распространены медь (0,34%), магний (0,23%), титан (0,19%). Также присутствуют незначительные количества бария (0,08%), фосфора (0,07%), марганца (0,05%) стронция (0,04%), цинка (0,01%), мышьяка (0,008%), свинца (0,007%), рубидия (0,004%).

Химический состав пробы хорошо соответствует её минеральному составу: преобладающие породообразующие минералы обуславливают повышенное содержание Si (кварц, альбит, ортоклаз, мусковит), Al (альбит, ортоклаз, мусковит), Ca, Sr и Mg (карбонаты), Na (альбит), K (Rb) (ортоклаз, мусковит) [6]. В скобках указаны геохимические «двойники» элементов, имеющие подчинённое распространение и схожее поведение в ходе минералообразования. Акцессорные и рудные минералы содержат менее распространённые компоненты: Ti (рутил), P (апатит), S, Cu, Zn, Pb, Ni, Co, As, Cd, (сульфиды), Mn, Cr (оксиды). Содержание Fe обусловлено присутствием рентгеноаморфных гидроокислов железа и сульфидов, концентрирующихся при обогащении. Это хорошо видно в существенном (3,59% в пенном продукте основной флотации, 3,40% – в пенном продукте контрольной флотации) возрастании содержания железа относительно исходного (1,38%).

Схожим образом ведут себя и сульфидообразующие элементы. Благодаря концентрации в продуктах обогащения халькозина (Cu, S), борнита и халькопирита (Cu, Fe, S), сфалерита (ZnS), гринокита (CdS), галенита (PbS), содержание

соответствующих элементов также возрастает. Никель, кобальт, молибден и мышьяк, очевидно, в изоморфной форме также входят в состав сульфидов.

Ранее отмечалось, что изучение результатов анализа пробы 2 показало на схожесть, в целом, её исходного химического и минерального состава с пробой 1. Существенным отличием, тем не менее, является повышенное содержание в этой пробе меди (0,46%), серы (0,33%) и других сульфидообразующих элементов. Это связано с первичным (природным) обогащением материала этой пробы сульфидами и, соответственно, проявляется в относительной обогащённости медью, молибденом, железом, серой, цинком и другими сульфидообразующими элементами концентратов (особенно – пенного основного) пробы 2, а также в появлении в пенном продукте основной флотации таллия (0,008%).

Сопоставление результатов микроскопического изучения и рентгенофазового анализа, в целом, демонстрирует схожие результаты.

Таблица 10 - Химический состав пробы 1 (исходной руды, концентратов и хвостов обогащения) по результатам рентгенфлуоресцентного анализа (по данным ЦКП СФУ)

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.76.16>

	Cu	Fe	S	Zn	Pb	Ni	Co	As	Cd	Mn	Mo	Ti	Cr	Zr	Si	Al	O	C	Ca	Mg	K	Na	P	Ba	Sr	Rb
Исходная	0,34	1,38	0,07	0,01	0,007	н/о	н/о	0,008	н/о	0,05	н/о	0,19	н/о	н/о	20,14	6,47	51,02	4,82	9,83	0,23	2,45	2,56	0,07	0,08	0,04	0,04
Пенный основной флотации	6,73	3,59	1,47	0,06	0,05	0,03	0,01	0,09	0,08	0,05	0,02	0,25	0,01	0,01	17,33	6,42	45,62	4,29	9,10	0,43	2,22	2,03	0,06	н/о	0,02	0,04
Пенный контрольной флотации	1,24	3,40	0,35	0,02	0,04	0,03	0,01	0,02	н/о	0,07	0,01	0,29	0,02	0,02	17,78	6,81	50,45	4,14	9,96	0,46	2,59	2,11	0,06	0,08	0,03	0,03
Камерный контрольной флотации	0,06	1,50	0,03	0,01	0,004	0,007	н/о	н/о	н/о	0,05	н/о	0,17	0,01	0,01	20,65	6,48	51,58	4,37	9,52	0,27	2,49	н/о	0,07	0,08	0,03	0,04

Таблица 11 - Химический состав пробы 2 (исходной руды, концентратов и хвостов обогащения) по результатам рентгенфлуоресцентного анализа (по данным ЦКП СФУ)

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.76.17>

	Cu	Fe	S	Zn	Pb	Ni	Co	As	Cd	Mn	Mo	Ti	Cr	Zr	Si	Al	O	C	Ca	Mg	K	Na	P	Ba	Sr	Tl
Исходная	0,46	1,43	0,33	0,02	0,02	0,006	0,004	0,001	н/о	0,04	0,02	0,24	0,008	н/о	19,88	6,89	51,50	4,46	8,93	0,36	2,40	2,66	0,10	0,08	0,04	н/о
Пенный основной флотации	7,75	8,83	7,42	0,16	0,15	0,02	0,03	0,17	0,28	0,05	0,20	0,25	0,01	0,007	15,73	6,03	39,97	4,20	5,92	н/о	0,68	2,06	0,06	н/о	0,02	0,008
Пенный контрольной флотации	1,03	2,77	0,91	0,06	0,09	0,01	0,01	0,04	н/о	0,05	0,14	0,36	0,02	0,01	18,69	7,25	49,89	4,04	9,16	0,49	2,49	2,31	0,07	0,07	0,03	н/о
Камерный контрольной флотации	0,05	1,14	0,06	0,02	0,01	0,005	н/о	н/о	н/о	0,04	0,01	0,24	0,007	0,02	20,82	7,16	52,02	3,96	8,59	0,34	2,53	2,74	0,09	0,09	0,04	н/о

Заключение

В Сибирском федеральном университете были выполнены исследования по получению флотационных концентратов двух технологических проб Раисинского месторождения. Из лабораторной пробы 1 получен флотационный концентрат марки КМ4, из пробы 2 – КМ7. Полученные концентраты по содержанию основных компонентов и вредных примесей соответствуют требованиям ГОСТ Р52998-2008 «Концентрат медный. Технические условия (с поправкой)».

Изучен вещественный состав проб 1 и 2 медной руды с массовой долей меди 0,458 и 0,6% соответственно. Рудная часть проб представлена в незначительных количествах (до 2-4%) первичными минералами меди – халькозином, халькопиритом, борнитом, вторичными – ковеллином, блеклыми рудами, карбонатами меди – малахитом, азурином, оксидами – купритом. Обнаружена самородная медь. Найдены сфалерит, рутил, гематит и др. Содержание пирита составляет менее 0,5%. Количество самородного серебра в пробах 1 и 2 невысокое 7,1-7,2 и 13,8-14,2, золота – менее 0,1 г/т соответственно. В пробах существенно преобладают породообразующие минералы, представленные кварцем, кальцитом, доломитом, альбитом, ортоклазом и мусковитом [13].

Тестовые исследования показали возможность получения флотационных концентратов меди марки КМ4 и КМ7 с содержанием меди 23,2 и 12,2% (пробы 1 и 2) при извлечении 68,59 и 86,82% соответственно. Хвосты основной флотации (камерный продукт) в обеих пробах содержат в среднем 0,11% меди, потери составляют 31,41 и 13,18% соответственно. Проведение контрольной флотации позволяет дополнительно извлечь 20,5% и 7,92% меди от исходной руды [9].

Руда проб относится к малосульфидной, легкофлотируемой.

Разработан оптимальный реагентный режим: крупность питания – 85% класса 0,071-0 мм; плотность питания основной флотации – 30% твердого; расход реагентов на 1 т руды в основной флотации: соды – 500 г/т, Na₂S – 50 г/т, бутиловый ксантогенат калия – 50 г/т, Т-92 (оксаль) – 50 г/т; расход реагентов на 1 т руды в контрольной флотации: бутиловый ксантогенат калия – 35 г/т, Т-92 (оксаль) – 35 г/т, время перемешивания с реагентами, в минутах: с содой – 5, Na₂S – 5, ксантогенатом – 2, Т-92 – 1, время основной флотации – 5-6 минут, контрольной – 6 минут.

Таким образом, тестовые исследования позволяют констатировать перспективность флотационного обогащения руды Раисинского серебросодержащего меднорудного месторождения с последующим получением медных концентратов [12].

В будущем особое внимание следует уделить комплексному использованию руды, а именно изучить возможность дополнительного извлечения серебра [10], [11].

Финансирование

Исследование выполнено в рамках НИОКР «Тестовые исследования 2 проб руды Печищенского и Раисинского месторождения методом флотации».

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The study was carried out within the framework of the Scientific research and development work "Test Studies of 2 Ore Samples of the Pechishchensky and Raisinsky Deposits by Flotation Method".

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Бордонос В.П. Анализ геологической изученности Печище-Раисинского серебро-золотосодержащего меднорудного поля и оценка целесообразности его ввода в сферу лицензирования / В.П. Бордонос. — Красноярск, 2010.
2. Технологическая оценка минерального сырья. Методы исследования: справочник / под ред. П.Е. Остапенко. — М.: Недра, 1990. — 268 с.
3. Практикум по обогащению полезных ископаемых: учеб. пособие для вузов / под ред. Н.Г. Бедраня. — М.: Недра, 1991. — 526 с.
4. Исследование полезных ископаемых на обогатимость: учеб. пособие для вузов / С.И. Митрофанов, Л.А. Барский, В.Д. Самыгин. — М.: Недра, 1974. — 352 с.
5. Изоитко В.М. Технологическая минералогия и оценка руд / В.М. Изоитко. — СПб.: Наука, 1997. — 582 с.
6. Anthony J.W. Handbook Of Mineralogy. Vol. V. Borates, Carbonates, Sulfates / J.W. Anthony, R. A. Bideaux, K.W. Bladh et al. — Tucson : Mineral Data Publishing, 2003. — 813 p.
7. Козин В.З. Исследование руд на обогатимость: учеб. пособие / В.З. Козин. — Екатеринбург: Изд.-во УГГУ, 2008. — 314 с.
8. Леонов С.Б. Исследование полезных ископаемых на обогатимость: учеб. Пособие / С.Б. Леонов, О.Н. Белькова. — М.: Интернет Инжиниринг, 2001. — 631 с.
9. ГОСТ Р 52998-2008. Концентрат медный. Технические условия (с Поправкой): национальный стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому

регулированию и метрологии от 6 ноября 2008 г. № 291-ст: введен впервые: дата введения 2010-01-01 / разработан ОАО «Уралме-ханобр». — Москва: Стандартиформ, 2008. — 6 с.

10. Кондратьев С.А. О перспективах использования рационально-термической обработки при обогащении техногенного сырья Новосибирского оловокомбината / С.А. Кондратьев, В.И. Ростовцев, И.И. Бакшеева // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2017. — № 2. — с. 135-143.

11. Ростовцев В.И. Совершенствование обогащения медно-никелевых руд на основе энергетических воздействий / В.И. Ростовцев, С.А. Кондратьев, И.И. Бакшеева // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2017. — № 5. — с. 123-130.

12. Коннова Н.И. Обогащение и переработка минерального и техногенного сырья: учебник: в 2 ч. Ч.1 / Н.И. Коннова, Э.А. Рудницкий. — Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2020. — 222 с.

13. Коннова Н.И. Рудная и технологическая минералогия: учебное пособие / Н.И. Коннова. — Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2019. — 176 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Bordonosov V.P. Analiz geologicheskoy izuchennosti Pechishhe-Raisinskogo srebro-zolotosoderzhashhego mednorodnogo polja i ocenka celesoobraznosti ego vvoda v sferu licenzirovaniya [Analytical Geological Notification of the Furnace-Chairman of the Silver-Gold-Bearing Copper-Ore Field and its Assessment of the Purpose are Introduced into the Sphere of Licensing] / V.P. Bordonosov. — Krasnoyarsk, 2010. [in Russian]

2. Tehnologicheskaja ocenka mineral'nogo syr'ja. Metody issledovaniya [A Technological Evaluation of Mineral Cheese. Search methods]: directory / ed. by Or. Ostapenko. — M.: Nedra, 1990. — 268 p. [in Russian]

3. Praktikum po obogashheniju poleznyh iskopaemyh [Practice on the Double-Edged Most Commonly Used]: study guide for universities / ed. by N.D. Bedranya. — M.: Nedra, 1991. — 526 p. [in Russian]

4. Issledovanie poleznyh iskopaemyh na obogatimost' [Mineral Exploration for Enrichment]: study guide for universities / S.I. Mitrofanov, L.A. Barsky, V.D. Samygin. — M.: Nedra, 1974. — 352 p. [in Russian]

5. Izoitko V.M. Tehnologicheskaja mineralogija i ocenka rud [Technological Mineralogy and Ore Evaluation] / V.M. Izoitko. — St. Petersburg: Nauka, 1997. — 582 p. [in Russian]

6. Anthony J.W. Handbook Of Mineralogy. Vol. V. Borates, Carbonates, Sulfates / J.W. Anthony, R. A. Bideaux, K.W. Bladh et al. — Tucson : Mineral Data Publishing, 2003. — 813 p.

7. Kozin V.Z. Issledovanie rud na obogatimost' [Ore Removal for Enrichment]: study manual / V.Z. Kozin. — Yekaterinburg: Publishing House of UGSU, 2008. — 314 p. [in Russian]

8. Leonov S.B. Issledovanie poleznyh iskopaemyh na obogatimost' [Mineral Exploration for Enrichment]: manual / S.B. Leonov, O.N. Belkova. — M.: Intermet Engineering, 2001. — 631 p. [in Russian]

9. GOST R 52998-2008. Koncentrat mednyj. Tehnicheskie uslovija [Copper Concentrate. Technical Rules] (As amended): the national standard of the Russian Federation: approved and put into effect the principle of the Federal Agency for Technical Regularization and Metrology dated November 6, 2008 N 291-St : introduced : date of entry 2010-01-01 / processed by JSC Uralme-hanobr. — Moscow: Standartnoform, 2008. — 6 p. [in Russian]

10. Kondratiev S.A. O perspektivah ispol'zovaniya racional'no-termicheskoy obrabotki pri obogashhenii tehnogenogo syr'ja Novosibirskogo olovokombinata [On the Prospects of Using Rational Heat Treatment with Technically Neglected Cheese of the Novosibirsk tin Processing Plant] / S.A. Kondratiev V.I. Rostovtsev, I.I. Bucksheeva // Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh [Physical and Technical Problems Associated with the Development of Field Deekers]. — 2017. — № 2. — p. 135-143. [in Russian]

11. Rostovtsev V.I. Sovershenstvovanie obogashhenija medno-nikelevyh rud na osnove jenergeticheskikh vozdeystvij [Joint Use of Images of Copper-Nickel Ores Based on Energy Returns] / V.I. Rostovtsev, S.A. Kondratiev, I.I. Bucksheeva // Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh [Physical and Technical Problems Associated with the Development of Field Seekers]. — 2017. — № 5. — p. 123-130. [in Russian]

12. Konnova N.I. Obogashhenie i pererabotka mineral'nogo i tehnogenogo syr'ja [Configuration and Processing of Mineral and Technogenic Cheese]: textbook: in 2 parts; part 1 / N.I. Konnova, E.A. Rudnitsky. — Krasnoyarsk: Sib. Feder. Un-ty, 2020. — 222 p. [in Russian]

13. Konnova N.I. Rudnaja i tehnologicheskaja mineralogija [Ore and Technological Mineralogy]: textbook / N.I. Konnova. — Krasnoyarsk: Sib. Feder. Un-ty, 2019. — 176 p. [in Russian]