ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья

Перспективные реагенты для извлечения стратегических металлов из труднообогатимого минерального сырья

Т.Н.Матвеева✉, Н.К.Громова, Л.Б.Ланцова
Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова РАН, Москва, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Матвеева Т.Н., Громова Н.К., Ланцова Л.Б. Перспективные реагенты для извлечения стратегических металлов из труднообогатимого минерального сырья // Записки Горного института. 2024. Т. 269. С. 757-764. EDN XAAEGH

Аннотация. Потребность горно-перерабатывающей промышленности в новых видах реагентов направленного действия обусловлена ухудшением вещественного состава перерабатываемых руд. Низкое содержание Au (менее 0,5-1,0 г/т), тонкодисперсная вкрапленность Au (0,1-10,0 мкм) в руде, схожие свойства разделяемых минералов крайне негативно влияют на показатели флотации при использовании традиционных реагентов, что приводит к существенным потерям ценного металла с хвостами обогащения. Расширение спектра отечественных флотационных реагентов на базе новейших достижений фундаментальных исследований и их целенаправленное применение на горно-обогатительных предприятиях позволит компенсировать негативное влияние минерального состава сырья и обеспечить максимальное извлечение стратегических металлов из труднообогатимых руд. Применение современных методов исследования (сканирующая электронная и лазерная микроскопии, УФ-спектрофотометрия, РФА и химический анализ) позволило визуализировать адсорбционный слой новых реагентов-собирателей ряда дитиокарбаматов с различным строением углеводородного радикала и органического модификатора на поверхности золотосодержащих сульфидов. Экспериментально установлено количество адсорбированных реагентов на поверхности минералов. Специфические особенности закрепления реагентов на минералах различного состава обусловили оптимальные соотношения их расходов в процесс флотации. Научно обоснованные реагентные режимы обеспечили повышение содержания золота в концентрате и снижение потери золота с хвостами на 5-6 % при флотационном обогащении упорной руды Малиновского месторождения.

***Ключевые слова*:** золотосодержащие минералы; труднообогатимые руды; флотационные реагенты; морфолин-дитиокарбамат; цианэтилдиэтилдитиокарбамат; растительный модификатор; извлечение

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00149, https://rscf.ru/project/22-17-00149/.

Поступила: 12.04.2024 ***Принята: 05.09.2024*** ***Онлайн: 25.09.2024*** ***Опубликована: 12.11.2024***

Введение. Труднообогатимое минеральное сырье, включая низкосортные руды и техногенные ресурсы, является важным источником стратегических металлов. На горно-обогатительных предприятиях страны наблюдается дисбаланс, вызванный несоответствием между имеющейся сырьевой базой и уровнем развития технологии переработки минерального сырья, что приводит к значительным потерям полезных компонентов, достигающим 30 % для традиционных руд и существенно больше для трудноизвлекаемых и техногенных ресурсов [1].

В условиях постоянного снижения содержания ценных металлов в исходном сырье и тонкого взаимного прорастания рудных минералов и вмещающих пород развиваются новые технологии для более эффективного извлечения стратегических металлов. Эти технологии основаны на комбинированных схемах, где флотация играет важную роль [2-5].

Существующие флотационные реагенты имеют свои ограничения и не всегда обеспечивают высокие показатели обогащения. Поэтому ведутся исследования с целью разработки новых флотационных хелатообразующих реагентов, которые могут быть более эффективными и экономически выгодными. Такие исследования включают не только синтез новых соединений, но и исследование

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

их свойств, определение оптимальных условий применения, а также оценку их влияния на технологические показатели процесса флотации.

Использование классических реагентных режимов часто ведет к снижению качества концентратов и росту себестоимости конечной продукции. Для снижения экономических затрат необходимо применять новые экологически безопасные отечественные реагенты, способные значительно повысить извлечение ценных металлов из труднообогатимого минерального сырья [6-8].

Для флотации используется большой ассортимент органических и неорганических реагентов [9-12]. Некоторые реагенты прошли испытание временем [13, 14], тогда как новые отражают меняющиеся потребности отрасли [15-17]. Новые и усовершенствованные реагенты отвечают как технологическим, так и экологическим требованиям [18-20].

Российский рынок флотационных реагентов характеризуется присутствием крупных отечественных производителей, таких как ООО «Квадрат Плюс», АО «Волжский Оргсинтез», ООО «МБИ-Синтез», ООО «Флотент Кемикалс Рус», ООО «НПП КВАЛИТЕТ», АО «УК БХХ «Оргхим». Ассортимент продукции включает дитиофосфаты [11], ксантогенаты, дитиокарбаматы, тионокарбаматы [21] и другие реагенты. Несмотря на большой ассортимент, на обогатительных фабриках ксантогенаты традиционно занимают лидирующие позиции.

В современных условиях интенсификации флотационного обогащения и переработки сложных поликомпонентных руд остро встает необходимость разработки и внедрения новых реагентов-собирателей с повышенной эффективностью и селективностью.

Исследования в этой области ведут Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II [8, 9], Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» [22-24], Институт горного дела СО РАН [25, 26], Горный институт КНЦ РАН [27], Иркутский национальный исследовательский технический университет [28], Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М.Федоровского [29, 30]. Композиции селективных собирателей на основе тионокарбаматов способствовали повышению извлечения золота из колчеданных медно-цинковых руд [22, 23]. Для доизвлечения золота из медно-порфировых руд были предложены ацетиленовые спирты и реагенты на их основе [24].

Исследована кинетика взаимодействия собирателей с минералами и показана роль физической формы сорбции реагента в элементарном акте флотации [25, 26]. Проводятся исследования по выбору селективных собирателей для извлечения минералов цветных и редких металлов из комплексных руд (патент РФ № 2381073). Зарубежные исследователи предлагают применение гумата и гипохлорита для депрессии арсенопирита и отделения халькопирита от галенита [31, 32], бутиламиноцеллюлозы при флотации сульфидных руд [33], различных сочетаний сульфгидрильных собирателей [34-36] и органических модификаторов [37] для флотации полиметаллических руд.

Под руководством академика В.А.Чантурия в ИПКОН РАН проведены системные исследования по разработке и тестированию новых эффективных реагентов направленного действия для извлечения золота, платины, меди и других ценных металлов из труднообогатимого минерального сырья [15, 38, 39].

Водные растворы соли дитиокарбаминовой кислоты – морфолиндитиокарбамата натрия (морфолинДТК) и цианэтилдиэтилдитиокарбамата (ЦЭДЭДТК) протестированы как при индивидуальной подаче во флотацию, так и в композиции с бутиловым ксантогенатом калия (БКК). Экстракт борщевика (ЭБ) исследован как модификатор поверхности золотосодержащих сульфидов. Перечисленные реагенты обладают способностью к комплексообразованию, благодаря чему оказывают селективное воздействие на флотируемость золотосодержащих сульфидов [40, 41].

В экстракте борщевика помимо углеводов, сахара, белков, каротина, аминокислот содержатся таннин, эфирные масла, кумарины [34]. Наибольший интерес представляют входящие с состав борщевика кумарины, которые являются циклическими соединениями с химически активными группами, способными образовывать комплексные соединения с металлами.

Цель данной работы состояла в получении новых научных знаний о механизме действия хелатообразующих реагентов-собирателей – производных дитиокарбаматов и органического модификатора на золотосодержащие сульфидные минералы и обоснование перспективности их применения индивидуально и в сочетании с бутиловым ксантогенатом для повышения извлечения стратегических металлов из труднообогатимого минерального сырья.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 269. С. 757-764
© Т.Н.Матвеева, Н.К.Громова, Л.Б.Ланцова, 2024

Методы. Сканирование поверхности аншлифов золотосодержащих сульфидных минералов и рудных образцов Малиновского месторождения выполнено лазерной (KEYENCE VK-9700) и электронной (LEO 1420VP) микроскопией. Комплекс этих методов позволил выявить наиболее характерные участки и оценить разницу изображений до и после взаимодействия с растворами реагентов. На снимках электронного и лазерного микроскопов визуализирована форма адсорбированной органической фазы реагента на поверхности минералов и определены ее размеры.

В ходе исследования проведено измерение линейных размеров и площадей новообразований реагента на поверхности минералов. Изображения поверхности аншлифов сульфидов, полученные на лазерном микроскопе, после обработки реагентом анализировались по методике [42]. Методика основана на замере площади участков, занятых реагентом, и вычислении степени покрытия минерала реагентом.

Руда Малиновского месторождения относится к золотосульфидно-кварцевому типу, в которой Au (1,4 г/т), Ag (50,3 г/т) и Cu (1,3 %) представляют основную промышленную ценность. Сульфидные минералы представлены FeAsS, FeS_2, $CuFeS_2$ и Fe_nS_{n+1}. Реже встречаются MoS_2, $CaWO_4$, ZnS, PbS, $FeO{\cdot}Fe_2O_3$, самородное Au. Количество сульфидов в среднем составляет 10-15 %. Содержание в руде As – 1, Fe – 8,6, Pb – 0,05, W – 0,08 %. Золото ассоциировано с халькопиритом ($CuFeS_2$) и арсенопиритом (FeAsS) [43].

По данным химического анализа ME-ICP06 тестируемой пробы руды максимальное содержание окисных минералов представлено кварцем (более 60 % SiO_2), около 14 % Al_2O_3, около 20 % суммарно оксидов железа, калия и магния. По результатам рентгенофазового анализа основными породообразующими минералами в пробе являются кварц – 67,2 %, хлорит – 11,5 %, мусковит – 7,5 %.

Для минералогического описания использовался аналитический комплекс Минерал С7 (оптический микроскоп Olympus BX51). Минерал С7 позволяет определять в автоматическом режиме минеральный состав образца, размеры зерен минерала и массовую долю минералов в сростках. Исследования аншлифа и микрофотографирование проводили с помощью программно-аппаратного комплекса лазерного микроскопа.

Методом УФ-спектроскопии определялись характеристические максимумы светопоглощения и концентрация реагентов в растворе. Количество адсорбированного реагента на минерале оценивалось после перемешивания его раствора с измельченной фракцией минерала крупностью –0,1+0,063 мм по формуле

$$q = \frac{V_{ж.ф}\left(C_{исх} - C_{ост}\right)}{1000P},$$

где $V_{ж.ф}$ – объем жидкой фазы, мл; $C_{исх}$ – исходная концентрация реагента, мг/л; $C_{ост}$ – остаточная концентрация реагента, мг/л; P – масса навески минерала, г.

Условия флотации руды Малиновского месторождения: пробу руды, измельченную до крупности 90 % – 0,071 мм, помещали в камеру лабораторной флотационной машины ФМЛ 1 (237 ФЛ). Флотация проходила в течение 5 мин при переменном расходе реагентов.

Содержание золота в пробах после флотации оценивалось пробирным анализом с последующим определением Au методом атомно-абсорбционной спектрометрии в аккредитованной лаборатории ООО «Стюарт Геокемикл энд Эссей».

Обсуждение результатов. Метод УФ-спектроскопии показал возможность образования хелатных комплексов новых реагентов с золотом. Ультрафиолетовая (УФ) спектроскопия широко используется для исследования химических реакций, в том числе взаимодействия различных реагентов с золотом. При этом анализируются спектры поглощения исследуемых растворов в УФ-диапазоне (табл.1).

В табл.1 приведены длины волн (λ_{max}), при которых определяются максимумы светопоглощения исследуемых химических соединений и величины оптических плотностей (D), замеренные на спектрофотометре. При смешивании водного раствора морфолиндитиокарбамата и золотосодержащего раствора наблюдаются значительные изменения в электронном спектре. В УФ-спектре морфолинДТК имеются характеристические пики светопоглощения при 261,2 и 285,2 нм. После

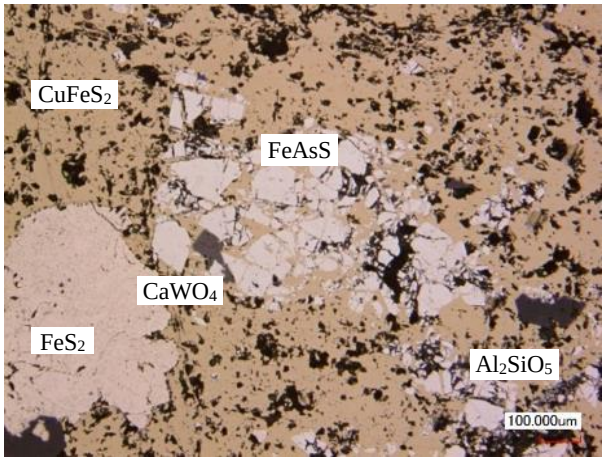
Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Таблица 1

Результаты анализа УФ-спектров растворов исследуемых химических соединений

Химическое соединение	λ_{max}, нм	*D*
Тетрахлороаурат(III) водорода	223,1 302,4	0,56 0,73
МорфолинДТК	261,2 285,2	0,39 0,41
Комплекс МорфолинДТК с Au	275,6 313,5	0,62 0,55
ЦЭДЭДТК	223,0 251,7 274,3	0,38 0,45 0,52
Комплекс ЦЭДЭДТК с Au	254,3 318,1	0,47 0,16

а



б

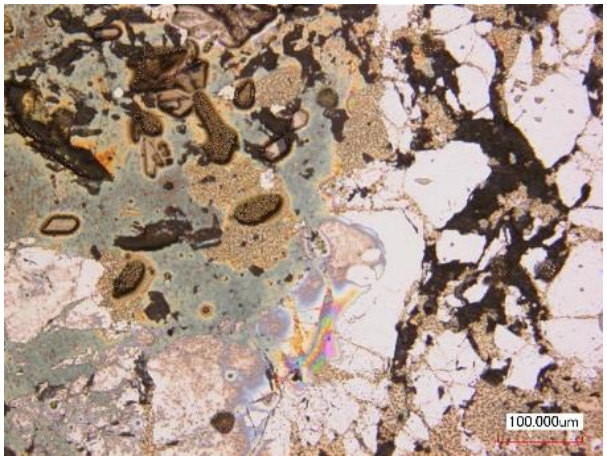


Рис.1. Нативный образец руды (*а*)
и после обработки морфолинДТК и ЭБ (*б*)

его взаимодействия с тетрахлороаурат(III) водородом определяются новые максимумы λ_{max} – 275,6 и 313,5 нм, которые отсутствуют в электронных спектрах исходных растворов.

В электронном спектре исследуемой смеси происходит изменение значений оптических плотностей, которые отличаются от аддитивной суммы *D* исходных веществ, это означает, что между компонентами происходит взаимодействие, приводящее к формированию комплекса морфолинДТК с Au.

Аналогичные изменения наблюдаются и при взаимодействии ЦЭДЭДТК с золотосодержащим раствором. Исходный раствор цианэтидиэтилдитиокарбамата характеризуется пиками λ_{max} = 251,7 и 274,3 нм. После добавления тетрахлороаурат(III) водорода появляются новые пики при длине волны 254,3 и 318,1 нм, в тоже время пропадает максимум светопоглощения при λ_{max} = 274,3 нм. Эти данные подтверждают образование комплекса ЦЭДЭДТК с Au.

Адсорбцию морфолинДТК на поверхности минералов с искусственно нанесенным Au изучали на измельченных до крупности –0,1+0,063 мм фракциях сульфидов. Критерием оценки служило изменение концентрации реагента, которая рассчитывалась по УФ-спектрам.

Экспериментально установлено, что после 5 мин кондиционирования раствора морфолиндитиокарбамата (*C* = 20 мг/л) с золотосодержащими арсенопиритом и халькопиритом его концентрация в суспензии падает до 2,5 мг/л, что подтверждает факт адсорбции морфолинДТК на поверхности сульфидов. Расчеты показали, что адсорбция морфолиндитиокарбамата составляет 0,7 мг/г, т.е. 87,5 % морфолинДТК закрепилось на минералах.

Данные УФ-спектроскопии необходимы для понимания механизмов взаимодействия золота с реагентами морфолинДТК и ЦЭДЭДТК, а также адсорбционных процессов на золотосодержащих минералах, что имеет важное значение для разработки методов извлечения золота из руд.

С помощью лазерной микроскопии получены снимки (рис.1) поверхности исходного рудного аншлифа Малиновского месторождения и после его кондиционирования с растворами морфолиндитиокарбамата и экстракта борщевика. Наблюдается различный характер адсорбции реагентов на минералах рудного образца: прерывистая светло-коричневая пленка реагента морфолинДТК распределилась по всей поверхности $CuFeS_2$, а на FeS_2 появились коричневые новообразования, на других рудных минералах морфолинДТК не закрепился. Бледно-голубая пленка растительного экстракта ЭБ закрепилась «поверх» морфолинДТК на халькопирите и пирите. Энергодисперсионный спектр пленки ЭБ на минералах идентичен спектру исходного экстракта. Ранее на

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 269. С. 757-764
© Т.Н.Матвеева, Н.К.Громова, Л.Б.Ланцова, 2024

мономинеральных аншлифах также была отмечена индивидуальность формирования адсорбционного слоя хелатообразующих реагентов. Новообразованные фазы сохраняются после промывки аншлифа водой, что подтверждает устойчивую фиксацию реагента на поверхности.

Полученные на лазерном микроскопе изображения поверхности аншлифов FeAsS, $CuFeS_2$ и $CuFeS_2$ с нанесенным Au после обработки реагентом ЦЭДЭДТК анализировались по методике [42]. Результаты анализа изображений показали, что значение степени покрытия поверхности минералов цианэтилдиэтилдитиокарбаматом составляет 8 % для FeAsS, 12 % для $CuFeS_2$ и 20,8 % для $CuFeS_2$ с нанесенным Au.

В экспериментах, проведенных в одинаковых условиях, было обнаружено, что степень покрытия различается и может быть использована в качестве основания для селективного разделения при флотации. Стоит отметить, что халькопирит с Au имеет самую высокую площадь покрытия поверхности среди исследованных минералов, т.е. обладает большей способностью к адсорбции реагента, что может быть полезным при его извлечении из руды.

После контакта халькопирита и арсенопирита с раствором ЦЭДЭТК на их поверхности появились каплевидные новообразования (рис.2, *а*). При последующей обработке минералов экстрактом борщевика поверхность покрывается радужной пленкой (рис.2, *б*).

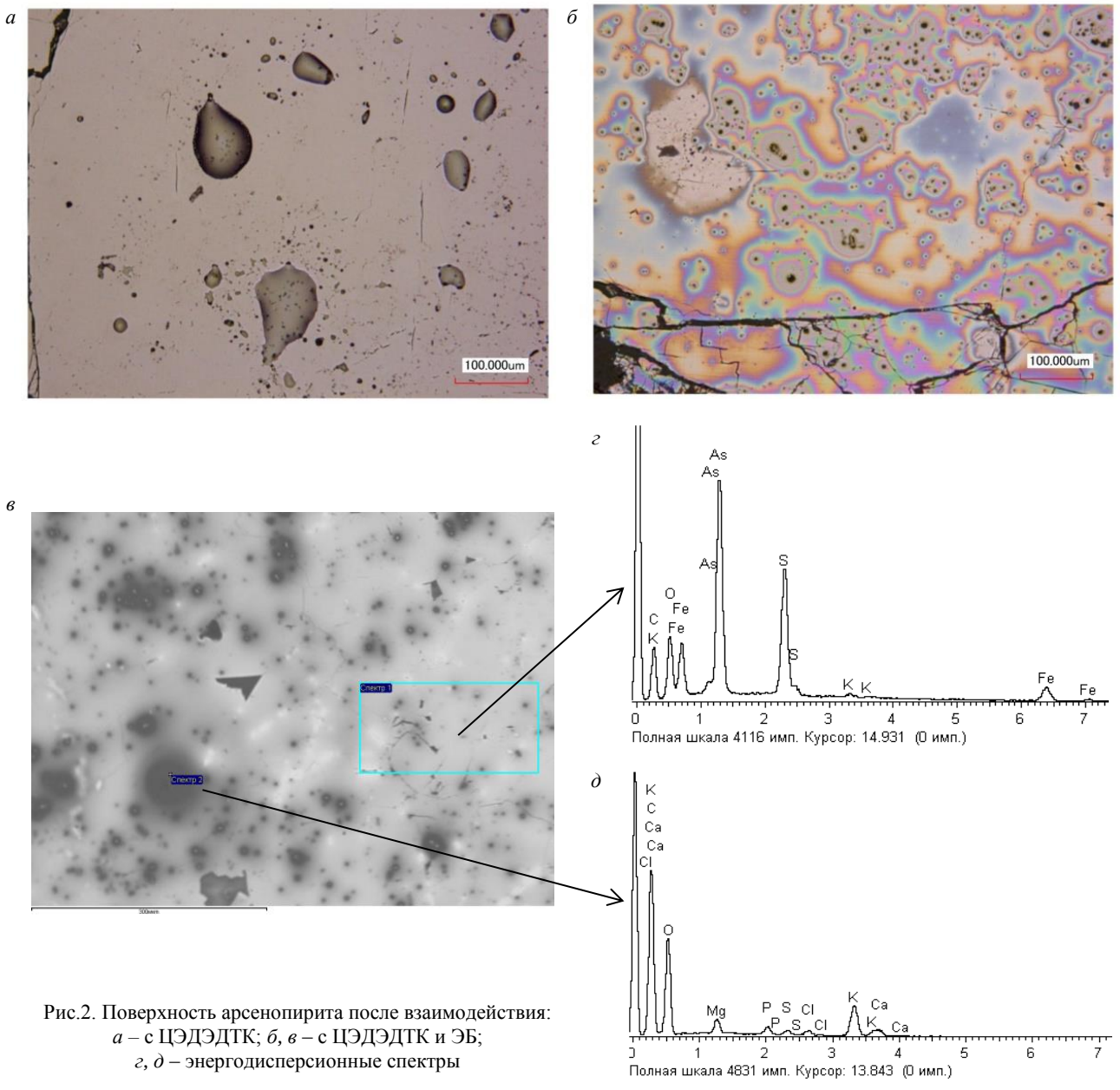


Рис.2. Поверхность арсенопирита после взаимодействия:
а – с ЦЭДЭДТК; *б*, *в* – с ЦЭДЭДТК и ЭБ;
г, *д* – энергодисперсионные спектры

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Т.Н.Матвеева, Н.К.Громова, Л.Б.Ланцова, 2024

На микрофотографиях электронного микроскопа LEO 1420VP поверхности FeAsS наблюдаются черные островки (рис.2, *в*), энергодисперсионный спектр которых (рис.2, *г*, *д*) совпадает со спектром ЭБ. В энергодисперсионном спектре ЭБ помимо пиков углерода C и кислорода O обнаружены интенсивные пики K и Ca, а также слабые пики Mg, P, S и Cl.

Всестороннее изучение характера вкрапленности рудных минералов и низкоразмерных минеральных агрегатов в исследуемых минеральных образцах позволило сформировать представление о типах минеральных ассоциаций и морфологической особенности зерен. При этом установлено определяющее влияние адсорбционного покрытия хелатообразующими реагентами (дитиокарбаматами и органическим экстрактом) на флотационные свойства минеральных агрегатов.

Результаты флотационного обогащения упорной золотосодержащей руды Малиновского месторождения показали (табл.2), что замена части бутилового ксантогената на цианэтилдиэтилдитиокарбамат привела к повышению содержания золота в концентрате на 0,55 г/т при увеличении извлечения на 2,4 %.

Таблица 2

Результаты флотационного обогащения руды Малиновского месторождения

Реагентный режим	Продукты	Выход, %	Содержание Au, г/т	Извлечение Au, %
БКК	Концентрат	17,04	11,57	85,30
	Хвосты	82,96	0,41	14,81
	Руда	100	2,31	100
ЦЭДЭДТК, БКК	Концентрат	17,22	12,12	87,67
	Хвосты	82,78	0,35	12,33
	Руда	100	2,38	100
ЦЭДЭДТК, ЭБ, БКК	Концентрат	17,30	12,25	91,34
	Хвосты	82,7	0,24	8,66
	Руда	100	2,32	100

Подача растительного модификатора усилила эффект комбинации собирателей и повысила извлечение золота на 6 % до 91,3 %, при этом содержание Au в хвостах снизилось с 0,41 до 0,24 г/т по сравнению с базовым опытом.

Заключение. В стремительно развивающемся мире высокотехнологичного производства возросла потребность в стратегических металлах. Расширение спектра отечественных флотационных реагентов, которые не уступают зарубежным аналогам по эффективности, приобретает особую актуальность. Разработка и научное обоснование новых флотационных хелатообразующих реагентов и их сочетаний основывается на фундаментальных исследованиях фазовых и химических превращений на поверхности минералов при взаимодействии с реагентами. Получение достоверных знаний возможно только на основе применения современных физико-химических методов анализа высокого разрешения. Понимание этих процессов является ключом к созданию реагентов с избирательным действием.

Результаты данных исследований подтвердили индивидуальный характер закрепления хелатообразующих реагентов-собирателей – производных дитиокарбаматов МДТК и ЦЭДЭДТК на золотосодержащих сульфидных минералах, входящих в состав поликомпонентной руды Малиновского месторождения, с образованием устойчивых комплексных соединений, обеспечивающих повышение извлечение золота в концентрат флотации. Замена части бутилового ксантогената на ЦЭДЭДТК привела к повышению содержания золота в концентрате на 0,55 г/т и росту извлечения на 2,4 %. Растительный модификатор, адсорбируясь на золотосодержащих сульфидах, усиливает эффект воздействия комбинации собирателей. Подача растительного модификатора повысила извлечение золота на 6 % до 91,3 %, при этом содержание Au в хвостах снизилось в 1,7 раза.

Разработка флотационных хелатообразующих реагентов и их композиций является научной задачей, имеющей большое практическое значение для горнодобывающей промышленности. Современные исследования в этой области опираются на передовые технологии для создания экологически безопасных и высокоэффективных решений.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 269. С. 757-764
© Т.Н.Матвеева, Н.К.Громова, Л.Б.Ланцова, 2024

Развитие исследований новых композиций реагентов позволит сократить потери стратегических металлов при переработке труднообогатимого минерального сырья.

Авторы выражают глубокую признательность канд. геол.-минерал. наук Е.В.Копорулиной и В.А.Минаеву за помощь в проведении исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Чантурия В.А., Козлов А.П.* Современные проблемы и приоритетные направления научных исследований в области переработки минерального сырья / Материалы Российского совещания с международным участием «Роль технологической минералогии в рациональном недропользовании». Москва, 15-16 мая 2018 г. М.: ВИМС, 2018. С. 11-15.

2. *Чантурия В.А.* Научное обоснование и разработка инновационных процессов комплексной переработки минерального сырья // Горный журнал. 2017. № 11. С. 7-13. DOI: 10.17580/gzh.2017.11.01

3. *Чантурия В.А.* Научное обоснование и разработка инновационных процессов извлечения циркония и РЗЭ при глубокой и комплексной переработке эвдиалитового концентрата // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 505-516. DOI: 10.31897/PMI.2022.31

4. *Чантурия В.А., Николаев А.И., Александрова Т.Н.* Инновационные экологически безопасные процессы извлечения редких и редкоземельных элементов из комплексных руд сложного вещественного состава // Геология рудных месторождений. 2023. Т. 65. № 5. С. 402-415. DOI: 10.31857/S0016777023050040

5. *Иваник С.А., Илюхин Д.А.* Флотационное выделение элементарной серы из золотосодержащих кеков // Записки Горного института. 2020. Т. 242. С. 202-208. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.202

6. *Chanturiya V.A., Kondratiev S.A.* Contemporary Understanding and Developments in the Flotation Theory of Non-Ferrous Ores // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2019. Vol. 40. Iss. 6. P. 390-401. DOI: 10.1080/08827508.2019.1657863

7. *Бочаров В.А., Игнаткина В.А., Каюмов А.А.* Теория и практика разделения минералов массивных упорных полиметаллических руд цветных металлов. М.: Горная книга, 2019. 432 с.

8. *Александрова Т.Н., Прохорова Е.О.* Модификация свойств породообразующих минералов при флотации // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 12. С. 123-138. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_12_0_123

9. *Александрова Т.Н., Орлова А.В., Таранов В.А.* Повышение эффективности переработки комплексных медных руд варьированием реагентного режима // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2020. № 6. С. 116-124. DOI: 10.15372/FTPRPI20200610

10. *Соложенкин П.М.* Влияние катионов свинца и меди на флотацию антимонита // Обогащение руд. 2024. № 1. С. 39-43. DOI: 10.17580/or.2024.01.07

11. *Рябой В.И., Шепета Е.Д.* Влияние поверхностной активности и гидрофобизирующих свойств диалкилдитиофосфатов на флотацию медных мышьяксодержащих руд // Обогащение руд. 2016. № 4. С. 29-34. DOI: 10.17580/or.2016.04.05

12. *Шумилова Л.В., Костикова О.С.* Сульфидизация серебро-полиметаллических руд месторождения «Гольцовое» для снижения потерь серебра с хвостами обогащения // Записки Горного института. 2018. Т. 230. С. 160-166. DOI: 10.25515/PMI.2018.2.160

13. *BalaRamesh P., Venkatesh P., Jabbar A.A.* Influence of Dithiocarbamate on Metal Complex and Thin Film Depositions // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 2014. Vol. 3. № 8. P. 15301-15309. DOI: 10.15680/IJIRSET.2014.0308033

14. *Ly N.H., Nguyen T.D., Zoh K.-D., Joo S.-W.* Interaction between Diethyldithiocarbamate and Cu(II) on Gold in Non-Cyanide Wastewater // Sensors. 2017. Vol. 17. Iss. 11. № 2628. DOI: 10.3390/s17112628

15. *Чантурия В.А., Гетман В.В.* Экспериментальные исследования взаимодействия модифицированных термоморфных полимеров с золотом и платиной в условиях обогащения труднообогатимых руд благородных металлов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2015. № 3. С. 138-144

16. *Wei Sung Ng, Connal L.A., Forbes E., Franks G.V.* A review of temperature-responsive polymers as novel reagents for solid-liquid separation and froth flotation of minerals // Minerals Engineering. 2018. Vol. 123. P. 144-159. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.03.027

17. *Semushkina L., Abdykirova G., Mukhanova A., Mukhamedilova A.* Improving the Copper-Molybdenum Ores Flotation Technology Using a Combined Collecting Agent // Minerals. 2022. Vol. 12. Iss. 11. № 1416. DOI: 10.3390/min12111416

18. *Aleksandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A. et al.* Extraction of Low-Dimensional Structures of Noble and Rare Metals from Carbonaceous Ores Using Low-Temperature and Energy Impacts at Succeeding Stages of Raw Material Transformation // Minerals. 2023. Vol. 13. Iss. 1. № 84. DOI: 10.3390/min13010084

19. *Spooren J., Binnemans K., Björkmalm J. et al.* Near-zero-waste processing of low-grade, complex primary ores and secondary raw materials in Europe: technology development trends // Resources, Conservation and Recycling. 2020. Vol. 160. № 104919. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104919

20. *Milosavljević M.M., Marinković A.D., Rančić M. et al.* New Eco-Friendly Xanthate-Based Flotation Agents // Minerals. 2020. Vol. 10. Iss. 4. № 350. DOI: 10.3390/min10040350

21. *Марфицин А.* Экономический эффект применения реагентов Flotent для горной промышленности // Золото и технологии. 2020. № 4 (50). С. 102-105.

22. *Бочаров В.А., Игнаткина В.А., Каюмов А.А.* Методы извлечения золота при обогащении упорных золотосодержащих колчеданных медно-цинковых руд. Часть 1. Анализ практики и выбор направлений селективного выделения минеральных фаз золота из колчеданных медно-цинковых руд // Цветные металлы. 2017. № 4. С. 11-16. DOI: 10.17580/tsm.2017.04.01

23. *Жаролла Н.Д., Ергешев А.Р., Игнаткина В.А.* Оценка селективности действия сульфгидрильных собирателей на основе дитиофосфатов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 11. С. 14-26. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-11-0-14-26

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

24. *Yushina T.I., Purev B., D'Elia Yanes K.S., Malofeeva P.R.* Improvement of porphyry copper flotation efficiency with auxiliary collecting agents based on acetylene alcohols // Eurasian Mining. 2019. № 1. P. 25-30. DOI: 10.17580/em.2019.01.06

25. *Кондратьев С.А., Семьянова Д.В.* Связь структуры углеводородного радикала флотационного реагента с его собирательными свойствами // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. № 6. С. 161-172. DOI: 10.15372/FTPRPI20180616

26. *Кондратьев С.А.* Физическая форма сорбции реагента и ее назначение во флотации. Новосибирск: Наука, 2018. 182 с.

27. *Митрофанова Г.В., Черноусенко Е.В., Компанченко А.А., Калугин А.И.* Особенности действия реагента-собирателя из класса алкиловых эфиров фосфорной кислоты при флотации апатит-нефелиновых руд // Записки Горного института. 2024. Т. 268. С. 637-645.

28. *Бурдонов А.Е., Вчисло Н.В., Верочкина Е.А., Розенцвейг И.Б.* Синтез новых производных ксантогенатов и дитиокарбаматов и их применение в процессах обогащения // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2023. Т. 13. № 2. С. 160-171. DOI: 10.21285/2227-2925-2023-13-2-160-171

29. *Курков А.В., Ануфриева С.И., Темнов А.В.* Перспективы разработки и внедрения комплексных технологий переработки отходов недропользования // Устойчивое развитие горных территорий. 2021. Т. 13. № 2 (48). С. 179-187. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-2-179-187

30. *Курков А.В., Мамошин М.Ю., Ануфриева С.И., Авдонин Г.И.* Иониты молекулярного распознавания – прорывное направление селективного извлечения металлов высоких технологий // Разведка и охрана недр. 2020. № 3. С. 35-46.

31. Shangyong Lin, Runqing Liu, Yongjie Bu et al. Oxidative Depression of Arsenopyrite by Using Calcium Hypochlorite and Sodium Humate // Minerals. 2018. Vol. 8. Iss. 10. № 463. DOI: 10.3390/min8100463

32. *Rui-zeng Liu, Wen-qing Qin, Fen Jiao et al.* Flotation separation of chalcopyrite from galena by sodium humate and ammonium persulfate // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2016. Vol. 26. Iss. 1. P. 265-271. DOI: 10.1016/S1003-6326(16)64113-4

33. *Lopéz R., Jordão H., Hartmann R. et al.* Study of butyl-amine nanocrystal cellulose in the flotation of complex sulphide ores // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2019. Vol. 579. № 123655. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2019.123655

34. *Xiao Jingjing, Liu Guangyi, Zhong Hong et al.* The flotation behavior and adsorption mechanism of O-isopropyl-S-[2-(hydroxyimino) propyl] dithiocarbonate ester to chalcopyrite // Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 2017. Vol. 71. P. 38-46. DOI: 10.1016/j.jtice.2016.12.022

35. *Tijsseling L.T., Dehaine Q., Rollinson G.K., Glass H.J.* Flotation of mixed oxide sulphide copper-cobalt minerals using xanthate, dithiophosphate, thiocarbamate and blended collectors // Minerals Engineering. 2019. Vol. 138. P. 246-256. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.04.022

36. *Kyaw Z.Y., Tiagalieva Z.A., Htet Z., Phyo K.K.* Improvement of reagent flotation modes of sphalerite and pyrite from deposits of copper-zinc pyrite, polymetallic copper-zinc pyrite and polymetallic ores // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 942. № 012004. DOI: 10.1088/1755-1315/942/1/012004

37. *Sarquís P.E., Menéndez-Aguado J.M., Mahamud M.M., Dzioba R.* Tannins: the organic depressants alternative in selective flotation of sulfides // Journal of Cleaner Production. 2014. Vol. 84. P. 723-726. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.08.025

38. *Иванова Т.А., Зимбовский И.Г., Е.В. Копорулина Е.В.* Повышение комплексности использования борщевика при обогащении золотосодержащих сульфидов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. № 2. С. 128-134.

39. *Matveeva T.N., Chanturiya V.A., Getman V.V. et al.* The Effect of Complexing Reagents on Flotation of Sulfide Minerals and Cassiterite from Tin-Sulfide Tailings // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2022. Vol. 43. Iss. 3. P. 346-359. DOI: 10.1080/08827508.2020.1858080

40. *Матвеева Т.Н., Громова Н.К., Ланцова Л.Б., Гладышева О.И.* К вопросу о механизме взаимодействия реагентов морфолиндитиокарбамата и цианэтилдиэтилдитиокарбамата с низкоразмерным золотом на поверхности сульфидных минералов при флотации труднообогатимых золотосодержащих руд // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2022. № 4. С. 98-107. DOI: 10.15372/FTPRPI20220410

41. *Матвеева Т.Н., Громова Н.К., Ланцова Л.Б.* Экспериментальное обоснование применения собирателей класса циклических и алифатических дитиокарбаматов для извлечения золотоносных сульфидов из комплексных руд // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2021. № 1. С. 137-145. DOI: 10.15372/FTPRPI20210113

42. *Матвеева Т.Н., Громова Н.К., Минаев В.А.* Количественная оценка адсорбционного слоя комбинированного диэтилдитиокарбамата на халькопирите и арсенопирите методом измерения параметров рельефа поверхности // Цветные металлы. 2018. № 7. С. 27-32. DOI: 10.17580/tsm.2018.07.04

43. *Доброшевский К.Н.* Геологическая позиция и минералого-геохимические особенности Малиновского золоторудного месторождения (Центральное Приморье): Автореф. дис. … канд. геол.-минерал. наук. Владивосток: Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения РАН, 2019. 30 с.

Авторы: **Т.Н.Матвеева,** *д-р техн. наук, заместитель директора, tmatveyeva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5658-9948* (*Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова РАН, Москва, Россия*), **Н.К.Громова,** *научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0002-4753-5745* (*Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова РАН, Москва, Россия*), **Л.Б.Ланцова,** *научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0002-6555-4165* (*Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова РАН, Москва, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0