



Обоснование применения пирролидиндитиокарбамата для извлечения сульфидных минералов цветных и благородных металлов из комплексных руд

Т.Н. Матвеева[✉], Н.К. Громова, Л.Б. Ланцова

Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук,
г. Москва, Российская Федерация

[✉] tmatveyeva@mail.ru

Резюме: Создание и применение новых реагентов селективного действия является одним из мировых трендов развития флотации, особенно в условиях снижения содержания полезных металлов в добываемых рудах, сложного взаимного прорастания минеральных зерен, неравномерной вкрапленности и комплексного вещественного состава руд. Такие характеристики свойственны так называемым труднообогатимым рудам, которые и являются в настоящее время минеральным сырьем для получения большинства металлов. Комплексный состав руд, с одной стороны, дает возможность получения концентратов нескольких металлов без увеличения экологической нагрузки на природный ландшафт, с другой – повышает требования к качеству готовой продукции по содержанию нежелательных примесей, то есть соблюдению условий селективного выделения разноименных концентратов для последующей металлургической переработки. Повышение эффективности разделения минеральных комплексов в условиях флотации может быть обеспечено избирательным действием флотационных реагентов нового поколения. Целью данной работы явилось изучение нового реагента из класса дитиокарбаматов – пирролидиндитиокарбамата (ПирроДТК) – в качестве собирателя сульфидных минералов при флотации комплексной золотомедной руды Малиновского месторождения. Сканирующей электронной LEO 1420VP и лазерной микроскопией KEYNCE VK-9700 идентифицированы фазы реагента на анилифах отдельных минералов и штраффных образцов руды, отличающиеся внешним видом, количеством, составом и прочностью закрепления в зависимости от состава минерала. УФ-спектрофотометрией Shimadzu-1800 определена адсорбция ПирроДТК на халькопирите 0,53 мг/г. Повышенная адсорбция ПирроДТК на халькопирите способствовала повышению содержания меди в концентрате с 9,77 до 13,33–15,2% и росту извлечения меди с 91,15 до 93,16%. Меньшая флотационная активность по отношению к арсенопириту и шеелиту проявилась в снижении содержания мышьяка в медном концентрате и сокращении потерь вольфрама с медным концентратом.

Ключевые слова: комплексные руды, флотация, пирролидиндитиокарбамат, электронная микроскопия, лазерная микроскопия, адсорбция

Благодарности: Авторы выражают благодарность кандидатам геол.-мин. наук Е.В. Копорулиной и В.А. Минаеву за помощь в проведении исследований.

Для цитирования: Матвеева Т.Н., Громова Н.К., Ланцова Л.Б. Обоснование применения пирролидиндитиокарбамата для извлечения сульфидных минералов цветных и благородных металлов из комплексных руд. *Горная промышленность*. 2025;(5S):52–58. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5S-52-58>

Rationale for using pyrrolidinedithiocarbamate in extraction of sulfide minerals of non-ferrous and noble metals from complex ores

T.N. Matveyeva[✉], N.K. Gromova, L.B. Lantsova

Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
[✉] tmatveyeva@mail.ru

Abstract: Creation and application of new selective reagents is one of the global trends in flotation development, especially in conditions of decreasing useful metal content in the mined ores, complex mutual intergrowth of the mineral grains, uneven impregnation and complex material composition of the ores. Such characteristics are typical of the so-called refractory ores, which are currently the mineral raw materials for obtaining most metals. The complex composition of ores, on the one hand, makes it possible to obtain concentrates of several metals without increasing the environmental load on the natural landscape, on the other hand, it increases the requirements for the quality of finished products in terms of undesirable impurities, i.e.

compliance with the conditions for selective separation of heterogeneous concentrates for subsequent metallurgical processing. Increasing the efficiency of separating mineral complexes under flotation conditions can be ensured by the selective action of a new generation of the flotation reagents. The aim of this work was to study a new reagent of the dithiocarbamates - pyrrolidine dithiocarbamate (PyrroDTC) class as a collector of sulfide minerals in flotation of complex gold-copper ore of the Malinovskoye deposit. LEO 1420VP scanning electron and KEYNCE VK-9700 laser microscopes were used to identify the reagent phases in the polished sections of individual minerals and ore samples that are different in appearance, quantity, composition and strength of fixation depending on the composition of the mineral. Shimadzu-1800 UV spectrophotometer determined the 0.53 mg/g adsorption of PyroDTC on chalcopyrite. Increased adsorption of PyroDTC on chalcopyrite contributed to an increase in the copper content in the concentrate from 9.77 to 13.33–15.2% and an increase in copper extraction from 91.15 to 93.16%. Lower flotation activity in relation to arsenopyrite and scheelite resulted in a decrease in the arsenic content in the copper concentrate and a reduction in tungsten losses with the copper concentrate.

Keywords: complex ores, flotation, pyrrolidine dithiocarbamate, electron microscopy, laser microscopy, adsorption

Acknowledgements: The authors express their gratitude to Candidates of Geological and Mining Sciences E.V. Koporulina and V.A. Minaev for their assistance in conducting the research.

For citation: Aynbinder I.I., Patskevich P.G. Rationale for using pyrrolidinedithiocarbamate in extraction of sulfide minerals of non-ferrous and noble metals from complex ores. *Russian Mining Industry*. 2025;(5S):52–58. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5S-52-58>

Введение

При флотационном концентрировании промышленно ценных компонентов из поликомпонентных руд [1–3] одним из эффективных способов повышения селективности процесса является усиление контрастности физико-химического состояния поверхности минералов и технологических свойств разных видов сульфидных минералов и минеральных комплексов путем применения новых хелатообразующих реагентов направленного действия [4]. При создании новых реагентов предпочтение отдается нетоксичным или менее токсичным веществам по сравнению к традиционными широко используемыми в практике флотации реагентами [5–8].

Из литературных источников [9–11] и собственных исследований [12–14] известно, что реагенты класса дитиокарбаматов, в молекулах которых дитиокарбоновая группа связана с атомом азота N-C(S)SH, более селективны по сравнению с ксантогенатом в отношении сульфидов меди, свинца, цинка и золота благодаря наличию в структуре молекулы функциональных групп атомов, способных образовывать устойчивые соединения с ионами цветных и благородных металлов [15] и повышать гидрофобные свойства целевых минералов в условиях флотации. Кроме этого, реагенты этой группы, как правило, менее активны в отношении минералов железа и мышьяка, снижающих качество медных концентратов.

В данной работе изучалась адсорбция пирролидиндиокарбамата (ПирроDTC) на анишлифах халькопирита, галенита, сфалерита и пирита, а также на анишлифе полиметаллической руды при совместном присутствии разных сульфидов с целью установления возможности использования ПирроDTC в качестве перспективного собираителя для флотации сульфидных минералов, содержащих цветные и благородные металлы.

Синтез ПирроDTC осуществляется по стандартному для дитиокарбаматов методу [16] взаимодействия амина с сероуглеродом в присутствии щелочей либо оснований (рис. 1).

Оба атома серы в дитиокарбаматах являются сильными и мягкими нуклеофилами, несущими отрицательный заряд, и проявляют склонность образовывать хелатные

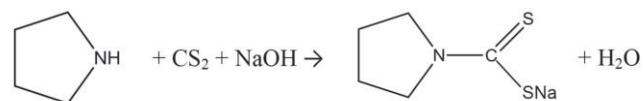


Рис. 1
Реакция синтеза пирроDTC

Fig. 1
Reaction of pyrroDTC synthesis

комpleksы с переходными металлами. Соли пирролидиндитиокарбамата обладают повышенной устойчивостью в кислой среде [15].

Высокая реакционная способность и простота синтеза дитиокарбаматов обуславливают их применение не только в аналитической химии, но и в других областях, в том числе флотации.

Объекты и методы исследования

Исследования выполнены на природных образцах сульфидных минералов – халькопирите, галените, сфалерите, пирите и арсенопирите, а также на частной пробе золотомедной комплексной руды Малиновского месторождения.

Химическим анализом ME-ICP06 в тестируемой пробе руды определено более 60% SiO₂, 14% Al₂O₃, суммарное содержание оксидов железа, калия и магния около 20% [4]. По результатам химического анализа ME-ICPORE и Au-AA25 содержание золота в пробе составляет 2,7 г/т, серебра – 56 г/т, меди – 1,65%, мышьяка – 1,1%, железа – 8,91%, серы – около 4%, свинца, цинка и молибдена менее 0,1%.

Программным комплексом Минерал C7 (SIAMS) определены количественные характеристики распределения минеральных сростков в различных классах крупности руды Малиновского месторождения, доля и размер сростков разноименных сульфидных минералов, занимающих доминирующее или подчиненное положение.

Оценка состояния поверхности сульфидных минералов до и после контакта с раствором реагента проводилась методом сканирующей лазерной и электронной микроскопии на высокоразрешающем сканирующем лазерном микроскопе KEYENCE VK-9700 и электронном микроско-

пе LEO 1420VP [17]. Элементный состав соединений на поверхности минералов определен по энергодисперсионным спектрам, снятым на приставке электронного микроскопа INCA Oxford 350.

Количество адсорбированного реагента ПирроДТК на фракции халькопирита флотационной крупности ($-0,1+0,063$ мм) определено методом УФ-спектроскопии на спектрофотометре Shimadzu-1800.

Условия рудной флотации. Измельчение дробленой руды проводили в лабораторной шаровой мельнице МШЛ-1 объемом 0,001 м³ при отношении Т:Ж:Ш 1:0,5:6 в течение 50 мин до крупности 85% класса $-0,074$ мм. Навеска руды 300 г. Измельченную руду помещали в камеру лабораторной флотационной машины ФМЛ 1 (237 ФЛ).

Флотационные испытания проведены по схеме основной флотации в открытом цикле с получением концентратов и хвостов. В качестве вспенивателя использовали МИБК при расходе 50 г/т. Суммарный расход собирателей 100 г/т. Время агитации с собирателями по 2 мин, вспенивателем – 1 мин. Время флотации 8 мин.

Результаты и их обсуждение

Методами сканирующей электронной LEO 1420VP и лазерной микроскопии KEYNCE VK-9700 идентифицированы фазы реагента на аншлифах отдельных минералов и штуфных образцов руды. Установлено, что на халькопирите и пирите ПирроДТК закрепляется в виде мелких дискретных формирований неправильной формы и пленок, покрывающих поверхность аншлифа.

Визуализация адсорбции ПирроДТК на галените показана на рис. 2. Поверхность галенита после обработки реагентом ПирроДТК полностью покрывается плотной коричневой пленкой. При увеличении $\times 150$ можно наблюдать, что пленка состоит из мелких новообразованных фаз. В энергодисперсионном спектре поверхности галенита, обработанного ПирроДТК, наблюдается повышенное содержание углерода (рис. 2, а), что свидетельствует об адсорбции органического реагента.

На сфалерите ПирроДТК адсорбируется в меньшей степени в виде очень мелких дискретных формирований, при этом на микроснимке включенияй галенита в образце сфалерита отчетливо видны новообразованные фазы (рис. 2, б).

Аналитическим сканирующим электронным микроскопом LEO 1420VP и лазерным сканирующим микроскопом Keyence VK-9700 изучалось состояние поверхности аншлифа, приготовленного из штуфного образца комплексной руды Малиновского месторождения до и после контакта с раствором реагента ПирроДТК.

Малиновское месторождение в Центральном Приморье относится к золотосульфидно-кварцевой формации и характеризуется сложным поликомпонентным составом руд, основную промышленную ценность имеют золото, серебро и медь. Количество сульфидов в рудах в среднем составляет 10–15%. Основными сульфидными минералами являются арсенопирит, пирит, халькопирит и пирротин. Гораздо реже в составе руд отмечается шеелит, молибденит, магнетит, сфалерит, галенит и пр. [18]. Распределение золота по классам крупности в исходной пробе руды Малиновского месторождения после мелкого дробления (-2 мм) носит достаточно равномерный характер, в среднем по 15–18% в каждом классе крупности. По результатам рентгенофазового анализа основные рудные минералы – халькопирит – 4,0%, пирит – 2,7%, арсенопирит – 0,8%. Основные нерудные – кварц – 67,2%, хлорит – 11,5%, мусковит – 7,5%.

Программным комплексом Минерал C7 (SIAMS) в штуфных образцах установлено доминирующее положение халькопирита – 48% и пирита – 30%, подчиненное положение – арсенопирита – 18% и шеелита – 4%. В халькопирите присутствуют вкрапленники остальных минералов, разброс размеров зёрен изменяется в широких пределах. Наиболее мелкие зерна арсенопирита – 125 мкм, зерна шеелита – 300 мкм, пирита – 125–250 мкм, отдельные зерна могут достигать 1 см. Около половины всех сростков вкрапленных минералов представлены сростками пирита и арсенопирита. Шеелит в 87 % случаев присутствует в сростках с арсенопиритом [17].

На рис. 3, а представлена изображение поверхности исходного аншлифа поликомпонентной руды, полученное с помощью лазерного микроскопа, на котором отчетливо видны зерна различных минералов. Исследование данного участка аншлифа на электронном микроскопе LEO 1420VP с получением энергодисперсионных спектров отдельных минеральных зерен показало, что рудные минералы представлены преимущественно халькопиритом и пиритом,

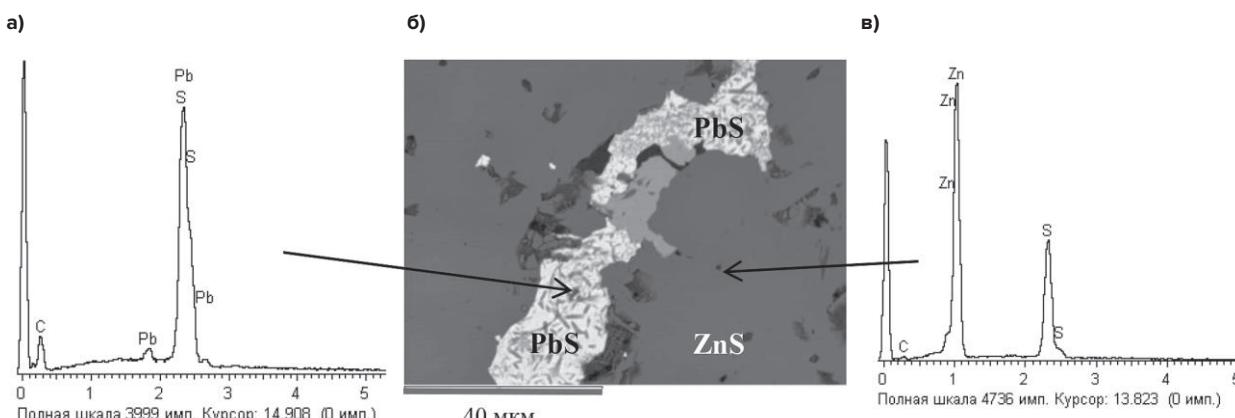


Рис. 2
Микрофотография поверхности аншлифа сфалерита с включениями галенита (б) и энергодисперсионные спектры галенита (а) и сфалерита (в) после контакта с ПирроДТК (электронный микроскоп LEO 1420VP)

Fig. 2
A microphotograph of the surface of a sphalerite polished section with inclusions of galena (б) and energy-dispersive spectra of galena (а) and sphalerite (в) after contact with Pyrrho-DTC (LEO 1420VP electron microscope)

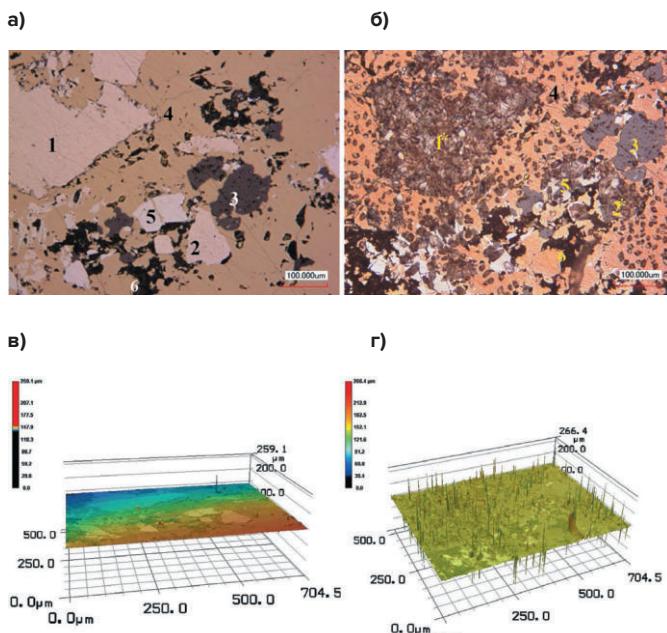


Рис. 3
Снимки поверхности аншлифа поликомпонентной руды до (а, в) и после (б, г) контакта с реагентом ПирроDТК:
1, 2 – пирит;
3 – шеелит;
4 – халькопирит;
5 – арсенопирит;
6 – алюмосиликат;
1*, 2* – новообразования на пирите;
в, г – 3D изображения (лазерный микроскоп Keyence VK-9700)

Fig. 3
Images of a polycomponent ore polished section surface before (a, b) and after (b, g) contact with the PyrroDTC reagent:
1, 2 – pyrite;
3 – scheelite;
4 – chalcopyrite;
5 – arsenopyrite;
6 – aluminosilicate;
1*, 2* – new formations on pyrite;
в, г – 3D images (Keyence VK-9700 VP laser microscope)

в меньшем количестве арсенопиритом и шеелитом. Зерна нерудных минералов представлены алюмосиликатами.

В результате обработки аншлифа раствором ПирроDТК на поверхности минералов происходит адсорбция реагента с образованием органических фаз различной фор-

мы, внешнего вида, размеров и прочности закрепления (рис. 3, б).

На халькопирите обнаружено формирование дискретной пленки оранжево-коричневого цвета, равномерно покрывающей всю поверхность минерала. Закрепление ПирроDТК на халькопирите, по всей видимости, происходит с образованием устойчивого не растворимого в воде комплексного соединения с медью [15], равномерно покрывающего всю поверхность минерала в виде мелких дискретных формирований пирролидиндитиокарбамата меди.

На зернах пирита отмечается появление коричневых новообразований (рис. 3, б), вероятно, относящихся к продукту окисления ПирроDТК – дипирролидинтиурамдисульфида (ПирроDТК)₂ [15; 19]. На поверхности пирита также определено образование соединения ПирроDТК-Fe, химически адсорбированного на минерале и устойчивого к многократной отмыивке водой.

На арсенопирите отмечены отдельные небольшого размера органические фазы. На шеелите и алюмосиликатах закрепление фаз реагента не обнаружено.

На 3D изображении аншлифа после контакта с раствором реагента наглядно прослеживается разница высот отдельных участков поверхности, характерных для зерен различных минералов.

На микрофотографии электронного микроскопа участка халькопирита также отчетливо видны дискретные новообразования реагента в виде темных органических фаз округлой формы размером 4–12 мкм (рис. 4, б).

В энергодисперсионном спектре этого участка (рис. 4, в) наблюдаются пики S и C, входящие в структуру реагента.

Устойчивость соединений ПирроDТК на халькопирите и пирите свидетельствует о прочной химической связи реагента с поверхностными центрами этих минералов – ионами Cu (II) в структуре халькопирита, склонными к образованию малорастворимых соединений с комплексообразующими соединениями, и поверхностью пирита, обладающего окислительными свойствами [5].

Методом УФ-спектрофотометрии установлены характеристические максимумы светопоглощения раствора ПирроDТК при 277; 254 нм (рис. 5).

Характеристический максимум светопоглощения раствора ПирроDТК в ультрафиолетовой области спектра

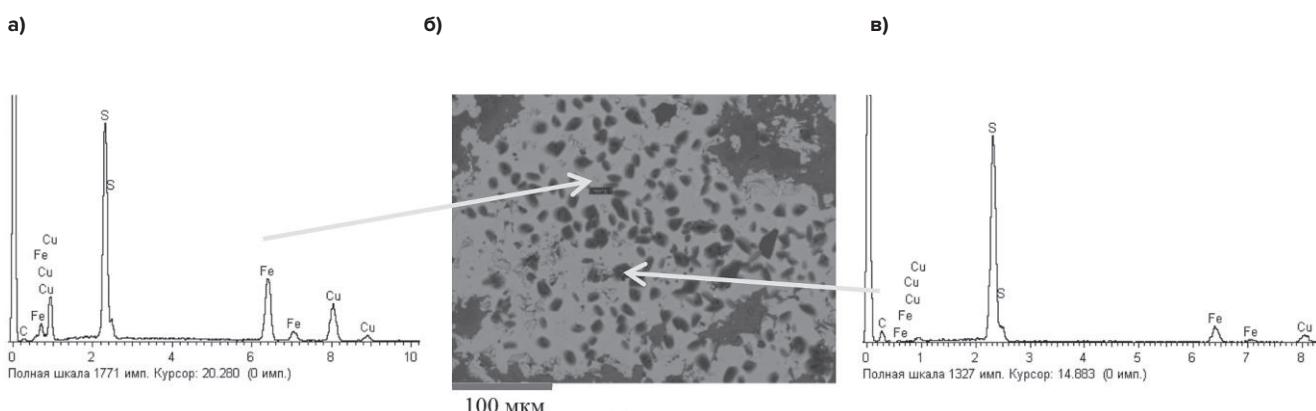
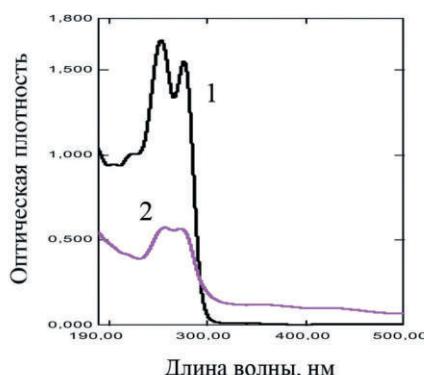


Рис. 4
Микрофотография участка поверхности аншлифа поликомпонентной руды с зерном халькопирита после контакта с ПирроDТК (б) и энергодисперсионные спектры халькопирита (а) и фазы адсорбированного реагента (в) (электронный микроскоп LEO 1420VP)

Fig. 4
A microphotograph of a section of a multicomponent ore polished section surface with a chalcopyrite grain after contact with PyrroDTC (b) and energy-dispersive spectra of chalcopyrite (a) and the adsorbed reagent phase (в) (LEO 1420VP electron microscope)



| Длина волны, нм | Оптическая плотность раствора ПирроDТК | |
|-----------------|--|---------------------|
| | Исходный | Послевзаимодействия |
| 277 | 1,55 | 0,56 |
| 254 | 1,67 | 0,57 |

Рис. 5
УФ-спектры исходного раствора ПирроDТК (1) и после взаимодействия с халькопиритом (2)

Fig. 5
UV spectra of the initial PyrroDTC solution (1) and after its interreaction with chalcopyrite (2)

при $\lambda = 254$ нм позволяет количественно оценить изменение концентрации реагента в растворе в соответствии с законом Бугера–Ламберта–Бера и адсорбцию реагента на минерале по разнице исходной и остаточной концентрации ПирроDТК в жидкой фазе суспензии.

На рис. 5 приведены УФ-спектр исходного раствора 20 мг/л ПирроDТК (спектр 1), а также УФ-спектр жидкой фазы суспензии после взаимодействия с халькопиритом (спектр 2). После 5 мин контакта минерала с исходным раствором ПирроDТК происходит резкое снижение оптической плотности с 1,67 до 0,57, что свидетельствует о понижении концентрации ПирроDТК в жидкой фазе суспензии до 6,94 мг/л, т.е. реагент адсорбировался на поверхности минерала.

Выполнен расчет количества адсорбированного реагента по формуле:

$$A = \frac{(C_{\text{исх}} - C_{\text{ост}})V_{\text{ж.ф.}}}{m},$$

где A – адсорбция реагента, мг/г; $C_{\text{исх}}$, $C_{\text{ост}}$ – исходная и остаточная концентрация реагента соответственно, мг/л; $V_{\text{ж.ф.}}$ – объем жидкой фазы, мл; m – масса навески минерала, мг.

Расчет показал, что адсорбция ПирроDТК на халькопирите составила 0,53 мг/г.

Тестирование реагента ПирроDТК в условиях флотации выполнено на частной пробе комплексной золотомедной руды Малиновского месторождения с содержанием меди 1,5%, мышьяка 1,12% и вольфрама 0,14%.

Результаты испытаний и расход реагентов представлены в табл. 1.

Таблица 1
Результаты флотации пробы поликомпонентной руды с использованием ПирроDТК и БКК

Как видно из табл. 1, при флотации в базовом режиме получен концентрат с содержанием меди – 9,77%, мышьяка – 5,29%, вольфрама – 0,37% при извлечении Cu – 91,15%, As – 5,29%, W – 32,4%. Замена 50% расхода ксантогената на ПирроDТК привела к повышению содержания Cu – до 13,33 % при небольшом снижении выхода концентрата и извлечения. При полной замене БКК на ПирроDТК (100 г/т) содержание меди в концентрате возросло до 15,2%, извлечение меди – до 93,16%. Следует отметить, что положительным воздействием реагента явилась его меньшая активность в отношении арсенопирита и вольфрамита. Содержание мышьяка в медном концентрате снизилось на 1,95%, вольфрама на 0,15%.

Таким образом, реагент проявил большую по сравнению с ксантогенатом избирательность действия к халькопириту и меньшую флотационную активность по отношению к арсенопириту и шеелиту, что может положительно отразиться на качестве медного концентраты с пониженным содержанием мышьяка и сократить потери вольфрама с медным концентратом.

Заключение

Методами оптической, сканирующей электронной и лазерной микроскопии получены новые экспериментальные данные о характере формирования адсорбционного слоя комплексообразующего реагента ПирроDТК на поверхности сульфидных минералов, входящих в состав поликомпонентной руды.

Впервые установлены и визуализированы различные формы адсорбированных фаз реагента на каждом из минералов при их совместном присутствии в аншилифе.

Table 1
Results of flotation of a polycomponent ore sample using PyrroDTC and BKK

| Расход реагентов, г/т | Продукты | Выход, % | Содержание, % | | | Извлечение, % | | |
|---------------------------|------------|----------|---------------|------|------|---------------|-------|-------|
| | | | Cu | As | W | Cu | As | W |
| БКК – 100 | Концентрат | 12,61 | 9,77 | 5,29 | 0,37 | 91,15 | 58,9 | 32,4 |
| | Хвосты | 87,39 | 0,137 | 0,11 | 0,11 | 8,85 | 41,1 | 67,6 |
| | Исходное | 100 | 1,35 | 1,13 | 0,14 | 100 | 100 | 100 |
| ПирроDТК – 50 БКК – 50 | Концентрат | 8,74 | 13,33 | 4,71 | 0,26 | 86,3 | 41,16 | 16,23 |
| | Хвосты | 91,26 | 0,21 | 0,13 | 0,13 | 13,7 | 58,84 | 83,77 |
| | Исходное | 100 | 1,4 | 1,12 | 0,14 | 100 | 100 | 100 |
| ПирроDТК – 100 | Концентрат | 8,08 | 15,2 | 3,34 | 0,22 | 93,16 | 24,09 | 14,89 |
| | Хвосты | 91,92 | 0,1 | 0,12 | 0,12 | 6,84 | 75,91 | 85,11 |
| | Исходное | 100 | 1,32 | 1,12 | 0,13 | 100 | 100 | 100 |

Установлена избирательная адсорбция ПирроДТК на халькопирите и пирите в форме устойчивых комплексов пирролидиндитиокарбамата меди, железа и дипирролидинтиурамдисульфида (ПирроДТК)₂. Методом УФ-спектрофотометрии определена величина адсорбции ПирроДТК 0,53 мг/г на халькопирите флотационной крупности.

Зафиксирована адсорбция ПирроДТК на галените в виде плотной коричневой пленки. Показано, что ПирроДТК не адсорбируется на шеелите и алюмосиликатах.

Избирательное закрепление реагента на рудных минералах сможет обеспечить их селективное извлечение в разноименные концентраты при флотации комплексных руд.

Тестирование ПирроДТК в условиях флотации золотомедной руды подтвердило селективность его действия к халькопириту и меньшую флотационную активность по отношению к арсенопириту и шеелиту, что привело к снижению содержания мышьяка в медном концентрате и сокращению потерь вольфрама с медным концентратом.

Список литературы / References

1. 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):116–124. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20200610>
Aleksandrova T.N., Orlova A.V., Taranov V.A. Enhancement of copper concentration efficiency in complex ore processing by the reagent regime variation. *Journal of Mining Science*. 2020;56(6):982–989. <https://doi.org/10.1134/S1062739120060101>
2. Бочаров В.А., Игнаткина В.А., Каюмов А.А. *Теория и практика разделения минералов массивных упорных полиметаллических руд цветных металлов*. М.: Горная книга; 2019. 510 с.
3. Semushkina L., Abdykirova G., Mukhanova A., Mukhamedilova A. Improving the copper-molybdenum ores flotation technology using a combined collecting agent. *Minerals*. 2022;12(11):1416. <https://doi.org/10.3390/min12111416>
4. Митрофанова Г.В., Черноусенко Е.В., Базарова Е.А., Тюкин А.П. Поиск новых комплексообразующих реагентов для флотации медно-никелевых руд. *Цветные металлы*. 2019;(11):27–33. <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.11.02>
Mitrofanova G.V., Chernousenko E.V., Bazarova E.A., Tyukin A.P. The search for new complexing reagents for copper-nickel ore flotation. *Tsvetnye Metally*. 2019;(11):27–33. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.11.02>
5. Aleksandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A., Romashev A., Aburova V., Prokhorova E. 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;13(1):84. <https://doi.org/10.3390/min13010084>
6. Spooren J., Binnemans K., Björkmalm J., Breemersch K., Dams Y., Folens K. 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;160:104919. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104919>
7. Milosavljević M.M., Marinković A.D., Rančić M., Milentijević G., Bogdanović A., Cvjetić I.N., Gurešić D. New eco-friendly xanthate-based flotation agents. *Minerals*. 2020;10(4):350. <https://doi.org/10.3390/min10040350>
8. Lopéz R., Jordão H., Hartmann R., Ämmälä A., Carvalho M.T. Study of butyl-amine nanocrystal cellulose in the flotation of complex sulphide ores. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2019;579:123655. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.123655>
9. Jingjing X., Guangyi L., Hong Z., Yaoguo H., Zhanfang C. 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;71:38–46. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.12.022>
10. 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;138:246–256. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.04.022>
11. 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;17(11):2628. <https://doi.org/10.3390/s17112628>
12. 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):137–145. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20210113>
Matveeva T.N., Gromova N.K., Lantsova L.B. Experimental proof of applicability of cyclic and aliphatic dithiocarbamate collectors in gold-bearing sulphide recovery from complex ore. *Journal of Mining Science*. 2021;57(1):123–130. <https://doi.org/10.1134/S1062739121010130>



13. Матвеева Т.Н., Громова Н.К., Ланцова Л.Б., Гладышева О.И. К Вопросу о механизме взаимодействия реагентов морфолиндиокарбамата и цианэтилдиэтилдиокарбамата с низкоразмерным золотом на поверхности сульфидных минералов при флотации труднообогатимых золотосодержащих руд. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2022;(4):98–107. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20220410>
Matveeva T.N., Gromova N.K., Lantsova L.B., Gladysheva O.I. Mechanism of interaction between morpholine dithiocarbamate and cyanoethyl diethyldithiocarbamate reagents and low-dimensional gold on the surface of sulfide minerals in flotation of difficult gold-bearing ore. *Journal of Mining Science*. 2022;58(4):610–618. <https://doi.org/10.1134/S106273912204010X>
14. Матвеева Т.Н., Громова Н.К., Ланцова Л.Б., Гладышева О.И. Экспериментальное обоснование применения реагента цианэтилдиокарбамата для повышения извлечения меди и серебра из лежальных хвостов Солнечного ГОКа. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(1):119–129. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_1_0_119
Matveeva T.N., Gromova N.K., Lantsova L.B., Gladysheva O.I. Experimental justification of cyanoethyl dithiocarbamate usability toward enhanced copper and silver recovery from old waste at Solnechny GOK. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(1):119–129. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_1_0_119
15. Бырько В.М. *Дитиокарбаматы*. М.: Наука; 1984. 342 с.
16. Бурдонов А.Е., Вчисло Н.В., Верочкина Е.А., Розенцвейг И.Б. Синтез новых производных ксантоценатов и дитиокарбаматов и их применение в процессах обогащения. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2023;13(2):160–171. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2023-13-2-160-171> Burdonov A.E., Vchislo N.V., Verochkina E.A., Rozentsveig I.B. Synthesis of new dithiocarbamate and xanthate complexes and their application in enrichment processes. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2023;13(2):160–171. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2023-13-2-160-171>
17. Матвеева Т.Н., Минаев В.А., Громова Н.К. Исследование характера закрепления комплексообразующих реагентов на поверхности рудных минералов методами оптической, сканирующей электронной и лазерной микроскопии. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2023;59(4):168–175. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20230418>
Matveeva T.N., Minaev V.A., Gromova N.K. Determining modes of thiol collector attachment at sulfide minerals by optical, electron scanning and laser microscopy. *Journal of Mining Science*. 2023;59(4):673–680. <https://doi.org/10.1134/S106273912304018X>
18. Дорошевский К.Н. *Геологическая позиция и минералого-геохимические особенности Малиновского золоторудного месторождения* (Центральное Приморье) [автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук]. Владивосток; 2019. 30 с.
19. Чантuria B.A., Wigdergauz B.E. *Электрохимия сульфидов. Теория и практика флотации*. М.: Руда и металлы; 2008. 272 с.

Информация об авторах

Матвеева Тамара Николаевна – доктор технических наук, заведующий отделом, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-5658-9948>; e-mail: tmatveyeva@mail.ru

Громова Надежда Константиновна – научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-4753-5745>; e-mail: gromova_nk@mail.ru

Ланцова Людмила Борисовна – научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0009-4585-1531>; e-mail: lblancova@yandex.ru

Information about the authors

Tamara N. Matveeva – Dr. Sci. (Eng.), Head of Department, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-5658-9948>; e-mail: tmatveyeva@mail.ru

Nadezhda K. Gromova – Research Associate, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-4753-5745>; e-mail: gromova_nk@mail.ru

Ludmila B. Lantsova – Research Associate, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0009-4585-1531>; e-mail: lblancova@yandex.ru

Article info

Received: 27.08.2025

Revised: 06.10.2025

Accepted: 09.10.2025

Информация о статье

Поступила в редакцию: 27.08.2025

Поступила после рецензирования: 06.10.2025

Принята к публикации: 09.10.2025