

УДК 622.7

**ПРИМЕНЕНИЕ НОВОГО КОМПЛЕКСООБРАЗУЮЩЕГО РЕАГЕНТА
ГРУППЫ ДИТИАЗИНОВ ПРИ ФЛОТАЦИОННОМ РАЗДЕЛЕНИИ
ГАЛЕНИТА И СФАЛЕРИТА**

В. В. Гетман, А. Ю. Каркешкина

*Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН,
E-mail: ipkon@inbox.ru, Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия*

В качестве нового реагента-собирателя для флотационного обогащения исследован комплексобразующий сорбент группы дитиазинов (1-карбокси-2-пергидро-(1,3,5-дитиазин)-5-илэтан) (КПДЭ). Изучение физико-химических свойств реагента, а также механизм его взаимодействия с поверхностью минералов сфалерита и галенита проводили методами ИК-, УФ-спектроскопии, в также методами измерения краевого угла смачивания и свободной энергии поверхности. Установлено, что в присутствии реагента поверхность галенита гидрофобизируется, а поверхность сфалерита, напротив, становится гидрофильной. Результаты сравнительной флотации минералов показали, что реагент КПДЭ обладает более высокой селективностью по сравнению с БКК и обеспечивает селективное флотационное разделение галенита и сфалерита.

Сфалерит, галенит, мономинеральная флотация, селективные реагенты, лазерная и электронная микроскопия, краевой угол смачивания, адсорбция, свободная энергия поверхности

DOI: 10.15372/FTPRI20250316
EDN: WLCVHX

Сульфидные минералы цинка и свинца — главные промышленные минералы цветных металлов и основные виды стратегического минерального сырья [1]. Свинцово-цинковые руды являются комплексными и имеют сложный минеральный состав. Помимо главных металлов Zn и Pb, они содержат Cd, Au, Sn, Se, Ag, Te, Sb, Bi, которые извлекаются в качестве попутных компонентов [2]. Большинство полиметаллических руд перерабатываются по схеме коллективной флотации минералов меди и свинца из исходной руды при депрессии сфалерита и пирита с последующим селективным разделением медно-свинцового концентрата [3–5]. Из хвостов медно-свинцового цикла извлекают сфалерит, иногда пирит. Коллективную медно-свинцовую флотацию проводят с применением в качестве собирателей различных ксантогенатов, аэрофлотов, меркаптобензотиазола, тиокарбанилида и тионоккарбаматов; часто используют сочетания собирателей. Для депрессии сфалерита используют цинковый купорос в щелочной среде, а также цианид и его сочетания с цинковым купоросом, сульфитом натрия, сернистым газом и др. [3–7].

В последние годы активно исследуются экологически безопасные реагенты, депрессоры, такие как крахмал, декстрин, карбоксиметилцеллюлоза и гуаровая камедь в качестве модификаторов флотации, являющиеся природным сырьем и нетоксичными продуктами [8]. Изучение

и выбор селективных собирателей, которые повышают извлечение минералов свинца в кондиционный товарный свинцовый концентрат и обеспечивают эффективное разделение галенита и сфалерита, остается актуальной задачей.

В ИПКОН РАН проводятся фундаментальные исследования по поиску и изучению новых реагентов-собирателей при флотации сульфидных руд, содержащих цветные, редкие и благородные металлы [9–13]. Исследованы реагенты класса дитиазинов: МТХ — пергидро-1,3,5-дитиазин-5-ил-метан и ЭТХ — бис-пергидро-1,3,5-дитиазин-5-илэтан, относящиеся к новому поколению эффективных сорбентов благородных металлов, используемых для предварительного их концентрирования из растворов. Установлено, что селективное выделение золота из золотосодержащих продуктов при флотации с применением МТХ и ЭТХ обусловлено образованием труднорастворимых соединений на поверхности частиц золота [14, 15]. Действие реагента МТХ исследовалось при флотации пирита с искусственно нанесенным золотом, а также для извлечения золота из золотосодержащей руды [16]. Реагент проявил селективные, но недостаточно сильные собирательные свойства, поэтому рекомендован в качестве дополнительного к ксантогенату (БКК) собирателя при флотации золотосодержащих продуктов [17]. Введение реагента ЭТХ в мельницу перед флотацией медно-сульфидной руды позволило существенно улучшить результаты флотации золота по сравнению с результатами, полученными с реагентами класса дитиазинов, вводимыми непосредственно в пульпу и особенно по сравнению с эталонным опытом с использованием ксантогената [18]. Реагент 5-амил-1,2,4-триазол-3-тион (АТТ) впервые применен в качестве собирателя при флотационном разделении галенита и сфалерита; показано, что АТТ химически сорбируется на галените и обеспечивает гидрофобизацию и флотацию частиц галенита [19].

Реагент 1-карбокси-2-пергидро-(1,3,5-дитиазин)-5-илэтан (КПДЭ) относится к группе дитиазинов, аналог соединения пергидро(1,3,5-дитиазин)-5-ил-метан. Большое сродство к тяжелым металлам предполагает возможность наличия флотационных качеств. КПДЭ получается синтезом из смеси с побочными олигомерными аминотиоэфирами. Механизм комплексообразования катионов металлов подобен этилендиаминтетрауксусной кислоте за счет наличия карбоксильной группы в составе молекулы. Использование синтезированного сорбента позволяет эффективно извлекать благородные и редкоземельные металлы из слабокислых водных растворов [20].

Цель настоящей работы — выяснение возможности использования реагента группы дитиазинов (1-карбокси-2-пергидро-(1,3,5-дитиазин)-5-илэтан) для флотационного разделения галенита от сфалерита.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводили на аншлифах, шлифах и мономинеральных порошках галенита и сфалерита. По данным химического анализа, сфалерит месторождения Кличка содержит 1 г/т золота, 60.2 г/т серебра, 25.04 % цинка, 1.36 % свинца, 0.18 % меди, сумма редких металлов 85.2 г/т. Галенит месторождения Сихали содержит 0.3 г/т золота, 999 г/т серебра, 72.5 % свинца, 25 % цинка, сумма редких металлов 20.85 г/т.

В качестве реагентов использовался реагент 1-карбокси-2-пергидро-(1,3,5-дитиазин)-5-илэтан (КПДЭ) и бутиловый ксантогенат калия (БКК). Растворы реагентов анализировали на спектрофотометре UV-1800 Shimadzu. Адсорбцию оценивали по остаточной концентрации реагента в растворе после взаимодействия с минеральным порошком, для этого 1 г минерала крупностью – 63 + 44 мкм перемешивали с раствором реагента КПДЭ.

Для исследования методом ИК-спектроскопии минерал крупностью – 44 мкм и массой 1 г контактировал 3 мин с реагентом, твердую фазу отделяли фильтрацией, промывали дистиллированной водой и высушивали на воздухе, после чего проводили измерения на ИК-Фурье спектрометре IR-Affinity (Shimadzu) в диапазоне длин волн $4000–400\text{ см}^{-1}$ со спектральным разрешением 4 см^{-1} .

Смачиваемость поверхности минералов, контактный угол и свободную энергию поверхности (СЭП) определяли на приборе измерения краевого угла смачивания DSA25 (KRUSS). Измеряли статический угол контакта, т. е. когда капля жидкости находится в неподвижном состоянии на твердой поверхности. Краевой угол смачивания измерялся на шлифах минералов до и после контакта с растворами реагентов КПДЭ и БКК. Минералы промывали дистиллированной водой, высушивали на воздухе и фиксировали на предметном столике установки измерения краевого угла смачивания DSA25. С помощью шприца с иглой, заполненного дистиллированной водой, на поверхность шлифа помещали каплю воды массой 1.5 мкг и фиксировали контактный угол или краевой угол смачивания (КУС) не менее чем в трех точках. После того, как капля воды помещалась на шлиф минерала, измерения проводили в течение 2 с и количество измерений составляло 5–10 в секунду, что позволяло получать достоверные значения КУС в каждой точке измерения. Время контакта с раствором реагента составляло 30 мин. Поверхность минерала после каждой серии измерений зачищали тонким кварцевым порошком и промывали дистиллированной водой.

Свободную энергию поверхности твердых минералов рассчитывали на основе краевого угла смачивания поверхности различными жидкостями. СЭП минералов определяли методом Оунса, Вендта, Рабеля, Кьельбле (ОБРК) [21–23]. Для расчета применяли программное обеспечение ADVANCE фирмы KRUSS, в качестве полярной жидкости — дистиллированную воду, дисперсионной — дийодметан. Полярную и дисперсионную составляющую СЭП рассчитывали с помощью линейного уравнения регрессии

$$\frac{(1 + \cos \theta)\sigma_L}{\sqrt{\sigma_L^D}} = \sqrt{\sigma_S^P} \sqrt{\frac{\sigma_L^P}{\sigma_L^D}} + \sqrt{\sigma_S^D}, \quad (1)$$

где σ_L — поверхностное натяжение жидкости на границе раздела “воздух–жидкость”; σ_L^D — дисперсная составляющая поверхностного натяжения жидкости на границе раздела “воздух–жидкость”; σ_L^P — полярная составляющая поверхностного натяжения жидкости на границе раздела “воздух–жидкость”; σ_S^P , σ_S^D — полярная и дисперсная составляющие свободной энергии поверхности минерала соответственно; $\cos \theta$ — краевой угол смачивания первой (вода) и второй анализируемой жидкости (дийодметана) [21–23]. Данное уравнение решается графически с помощью встроенного программного обеспечения ADVANCE.

Взаимодействие аншлифов минералов с реагентом изучали на аналитическом электронном микроскопе (РЭМ-PCMA, микроскоп LEO-1420 VP) с рентгеновским энергодисперсионным микроанализатором INCA-350 и на лазерном сканирующем конфокальном микроскопе (KEYENCE VK-9700).

Флотационные исследования осуществляли на мономинеральных фракциях галенита и сфалерита крупностью – $100 + 63\text{ мкм}$. Опыты проводили в дистиллированной воде, навеска минерала 1 г, объем камеры 0.035 л. В качестве собирателя использовали БКК, КПДЭ, в качестве вспенивателя — МИБК. Расход реагентов 0–40 мг/л.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование физико-химических свойств реагента 1-карбокси-2-пергидро-(1,3,5-дитиазин)-5-илэтан (КПДЭ). Реагент является гетероциклическим сероазотсодержащим соединением, в котором донорные атомы третичного азота и серы разделены углеводородными мостиками. Структура реагента представлено на рис. 1.

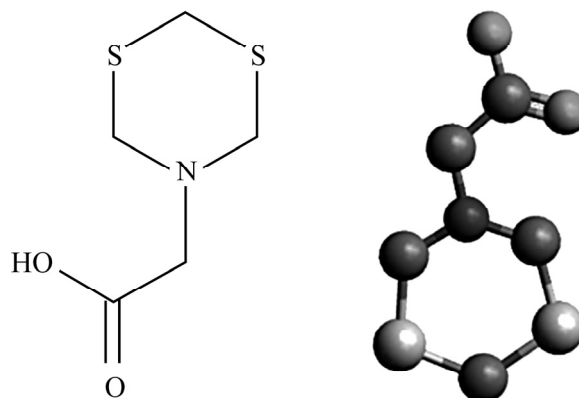


Рис. 1. Структура реагента КПДЭ

Синтез КПДЭ проводили в лабораторных условиях АО «Ведущий научно-исследовательский институт химической технологии» [10]. Синтезированный сорбент эффективно извлекает благородные и редкоземельные металлы из слабокислых водных растворов. В аминокислотах возможны два типа координации: через серу и через азот. В нейтральных средах координация лигандов осуществляется в первую очередь через атом азота.

Солянокислые растворы, в которых работает реагент КПДЭ в качестве сорбента для ценных минералов, существенно отличаются от условий, характерных для минеральной пульпы при флотации сульфидной руды. Реагент КПДЭ представляет собой белый порошок в виде воздушных хлопьев. Вещество состоит из растворимой и нерастворимой частей. Растворим в подкисленных водных растворах и органических растворителях. На рис. 2 показаны УФ-спектры реагента при различной концентрации (а) и pH (б). На спектрах растворов реагентов нет выраженного максимума, пик на спектре реагента КПДЭ проявляется в кислой среде при pH 3 и длине волны 192–194 нм (рис. 2).

На рис. 3а представлены УФ-спектры реагента различной концентрации при pH 3 и калибровочный график реагента (рис. 3б). ИК-спектры снимались на ИК-фурье-спектрофотометре Инфралуом FT-8 и Shimadzu (рис. 4).

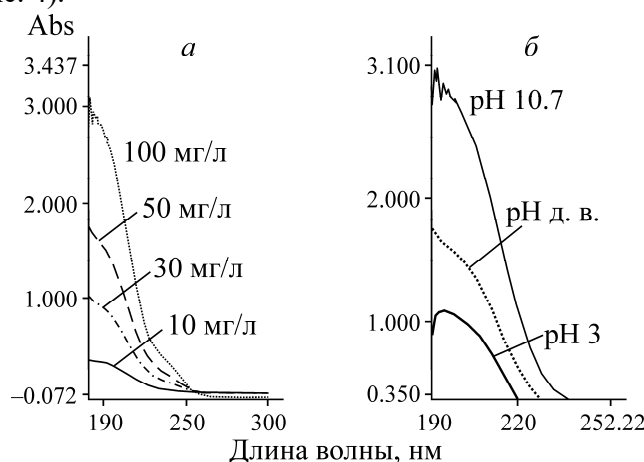


Рис. 2. УФ-спектры реагента КПДЭ при разной концентрации (а) и pH (б)

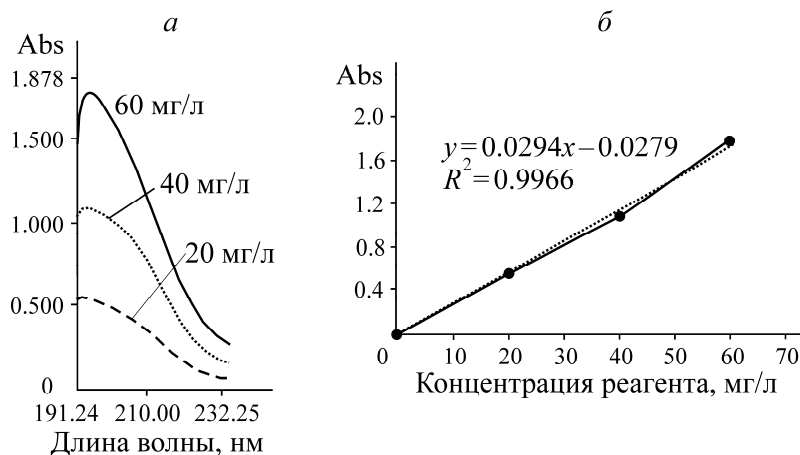


Рис. 3. УФ-спектры реагента КПДЭ разной концентрации при pH 3 (а) и калибровочный график (б)

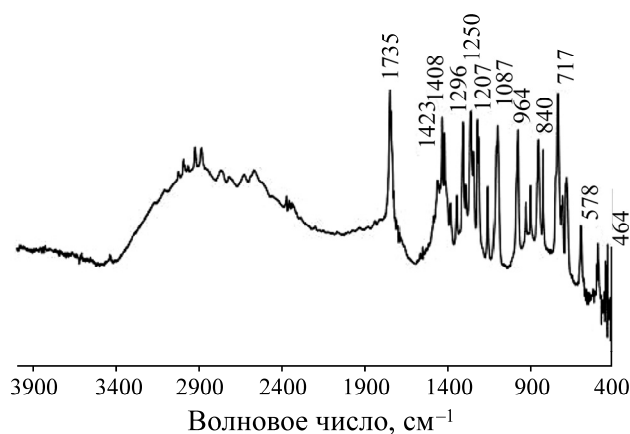


Рис. 4. ИК-спектр реагента КПДЭ

Интенсивная полоса поглощения с максимумом при 1735 см^{-1} отнесена к поглощению валентных колебаний группы $\text{C}=\text{O}$. Валентные колебания группы $\text{C}=\text{O}$ существенно выше значений, характерных для димеров предельных алифатических карбоновых кислот ($1715\text{--}1680\text{ см}^{-1}$), что обусловлено более высокой прочностью связи $\text{C}=\text{O}$ в сравнении с димерами насыщенных алифатических кислот. Интенсивные полосы в диапазоне $1300\text{--}1200\text{ см}^{-1}$ можно отнести к поглощению валентных колебаний связей $\text{C}-\text{O}$ в кислотах, а также в области поглощения деформационных колебаний связей OH -групп в кислотах ($970\text{--}840\text{ см}^{-1}$), валентных колебаний связей $\text{C}-\text{H}$ при 715 см^{-1} . Интенсивные линии с максимумами при $1420, 1408\text{ см}^{-1}$ можно отнести к валентным колебаниям $\text{C}-\text{N}$ связей ввиду их высокой интенсивности. Колебания $\text{C}-\text{S}$ проявляются в области $750\text{--}550\text{ см}^{-1}$ в виде малоинтенсивных полос [20].

Исследование адсорбции реагента КПДЭ методами ИК- и УФ-спектроскопии. В кислой и щелочной среде в насыщенном растворе реагента на ИК-спектрах галенита после взаимодействия с реагентом КПДЭ видны пики в диапазоне $880\text{--}1180\text{ см}^{-1}$, которые можно отнести к проявлению сорбции КПДЭ (рис. 5). Изучение ИК-спектров порошков минералов сфалерита после обработки реагентом не обнаружило следов сорбции.

Методом УФ-спектроскопии после взаимодействия реагента КПДЭ с минеральными порошками галенита и сфалерита в растворе с pH 3 на спектральной кривой появляются пики при длине волны $192\text{--}194\text{ нм}$. Адсорбция реагента по остаточной концентрации реагента на минеральных порошках рассчитывалась по уравнению калибровочной прямой реагента

(рис. 3б). По данным рис. 6, отмечено повышение адсорбции КПДЭ при pH 3 после взаимодействия с поверхностью галенита. В процессе 5-минутного перемешивания на 1 г минерала крупностью $-0.063 + 0.044$ мм адсорбировалось 1.23 мг реагента на галените (рис. 6). На сфалерите реагент практически не адсорбировался (0.22 мг/г).

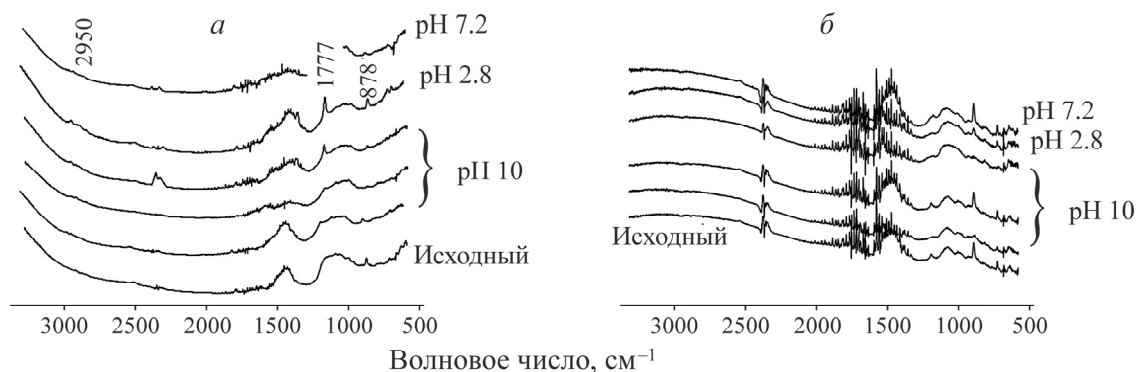


Рис. 5. ИК-спектры галенита (а) и сфалерита (б) до и после обработки реагентом КПДЭ при различном pH

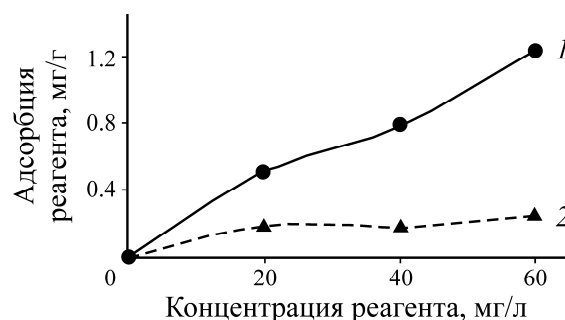


Рис. 6. Адсорбция КПДЭ на минеральных фракциях галенита (1) и сфалерита (2) при pH 3

Измерение краевого угла смачивания. Краевые углы смачивания и свободную энергию поверхности измеряли до и после контакта шлифов галенита и сфалерита с растворами КПДЭ с концентрацией 20 и 60 мг/л, а также при совместном применении КПДЭ 20 мг/л и БКК 20 мг/л. На рис. 7 приведены фотографии капли воды на шлифе галенита до обработки реагентами и после контакта с раствором КПДЭ 20 мг/л и БКК 20 мг/л.



Рис. 7. Фотографии, полученные на приборе измерения краевого угла смачивания DSA25, на чистой поверхности галенита (а) и после обработки в растворе КПДЭ 20 мг/л и БКК 20 мг/л (б)

В таблице представлены результаты измерения КУС и СЭП поверхности галенита и сфалерита до и после контакта с реагентами.

Результаты исследований краевого угла смачивания (КУС) и свободной энергии поверхности (СЭП) галенита и сфалерита до и после обработки реагентами

Условия эксперимента	Краевой угол смачивания, град	Свободная энергия поверхности, мДж/м ²	Полярная составляющая, мДж/м ²
Галенит			
Исходный (чистый)	61.72	52.58	10.79
КПДЭ — 20 мг/л	78.71	43.98	3.81
КПДЭ — 60 мг/л	85.94	37.14	2.61
КПДЭ — 20 мг/л БКК — 20 мг/л	90.92	30.86	2.32
Сфалерит			
Исходный (чистый)	69.45	30.61	4.66
КПДЭ — 20 мг/л	72.78	42.22	6.34
КПДЭ — 60 мг/л	70.08	47.14	7.34
КПДЭ — 20 мг/л БКК — 20 мг/л	68.45	49.84	7.32

Анализ полученных КУС до и после контакта с растворами реагентов показал, что на чистой поверхности галенита среднее значение КУС составляет 61.72°, что характеризует поверхность минералов как гидрофильную, так как КУС < 90°. После обработки шлифа реагентом КПДЭ с концентрацией 20 и 60 мг/л КУС увеличивается до 85.94°. При совместном применении КПДЭ 20 мг/л и БКК 20 мг/л среднее значение КУС составляет 90.92°, т. е. поверхность галенита гидрофобизируется. Значение свободной энергии поверхности галенита без обработки реагентами составляет 52.58 мДж/м², минимальное значение зафиксировано после обработки поверхности галенита смесью реагентов КПДЭ и БКК и равно 30.86 мДж/м². Зафиксировано изменение полярной составляющей соответственно с 10.79 до 2.32 мДж/м². При закреплении реагента-собираателя за счет хемосорбции происходит снижение полярной составляющей свободной энергии поверхности. Таким образом, снижение СЭП и полярной составляющей характеризует взаимодействие галенита с реагентами КПДЭ и БКК.

Измерения КУС на поверхности сфалерита показали, что обработка поверхности шлифа минерала растворами реагентов незначительно влияет на изменение значения КУС и варьирует в пределах 68.45 – 72.78°. При увеличении СЭП с 30.61 до 49.84 мДж/м² после взаимодействия с растворами КПДЭ и БКК смесь реагентов повышает смачиваемость минерала, поверхность становится гидрофильной, что подтверждает данные, полученные при исследовании адсорбции реагентов методами ИК- и УФ-спектроскопии.

Исследование взаимодействия КПДЭ на галените методом микроскопии. Методами лазерной и растровой электронной микроскопии и локального рентгеноспектрального микроанализа исследованы взаимодействия реагента КПДЭ с поверхностью аншлифа галенита. Отполированный аншлиф галенита (10 × 10 мм) обрабатывали 0.1 % раствором КПДЭ, затем промывали дистиллированной водой и проводили исследования. Образец аншлифа галенита находится в сростках со сфалеритом (рис. 8г). На рис. 8а, б показана поверхность галенита до и после обработки реагентом КПДЭ. На поверхности минерала после обработки реагентом видны новообразования в виде пленок (рис. 8б), на изображении снимка АСЭМ (рис. 8в) отмечены единичные темные пятна реагента, а снятые спектры в данных областях отмечают высокий пик углерода (рис. 8д).

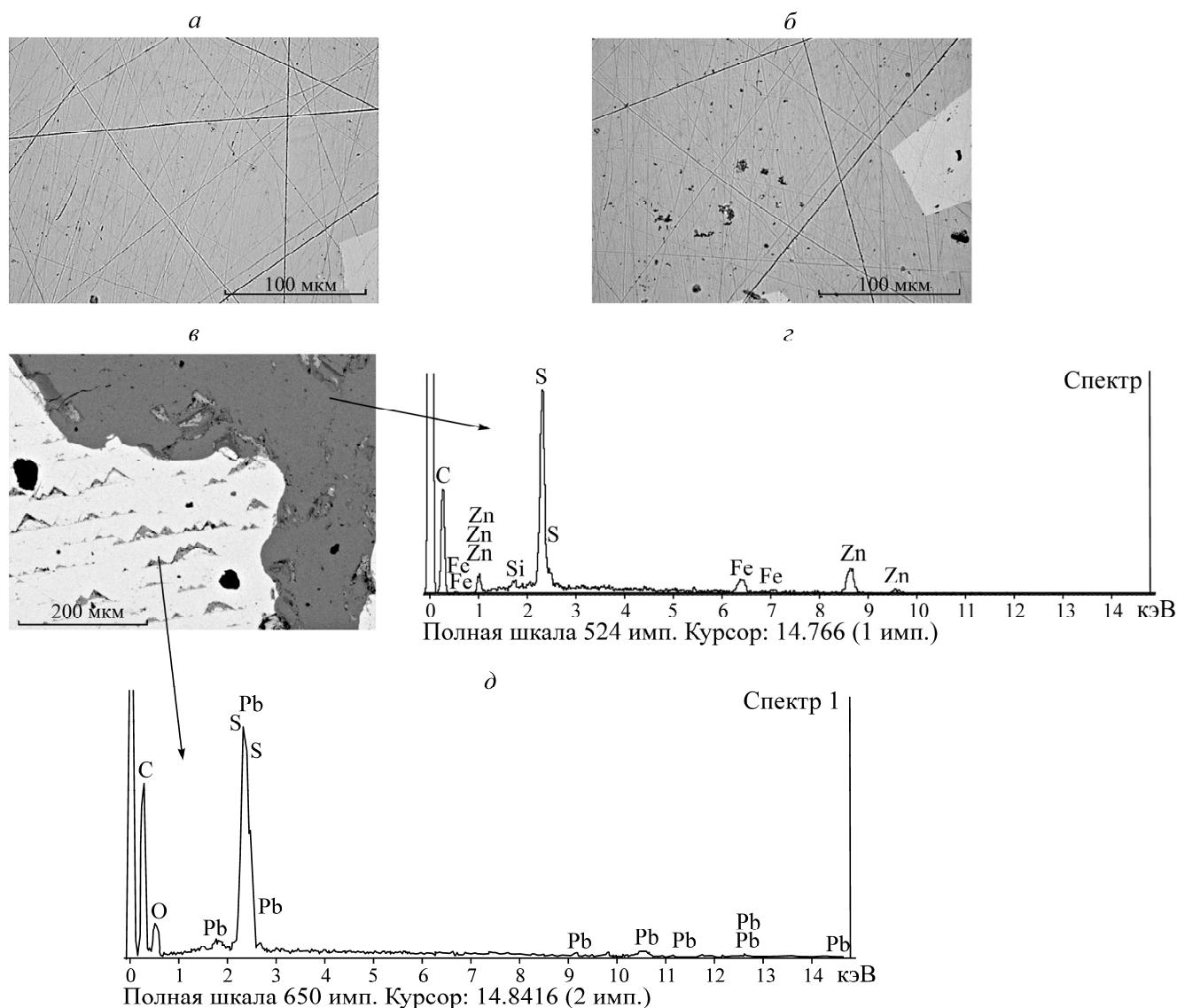


Рис. 8. Изображение поверхности аншлифа галенита до и после контакта с 0.1% раствором КПДЭ (а, б), снимок АСЭМ после контакта с 0.1% раствором КПДЭ (в), рентгеновский спектр сфалерита (г) и галенита (д)

Изучение селективности флотационного извлечения сульфидных минералов. В результате мономинеральной флотации галенита (рис. 9а), показано, что выход галенита в щелочной среде при pH 9.2 (NaOH) одним пенообразователем МИБК выше на 23 % по сравнению с нейтральной средой при pH 5.2. В щелочной среде с ростом концентрации КПДЭ выход галенита в концентрат повышается с 20 до 60 %. В нейтральной среде выход галенита возрастает незначительно с 4.7 до 22 % (рис. 9б). На рис. 10 представлены результаты сравнительной флотации минералов (галенита и сфалерита) при разной подаче реагентов. В результате сравнительной флотации минералов с использованием в качестве собирателя одного реагента КПДЭ выход галенита составил 41.4 %, сфалерита — 8.8 % (разница в выходе минералов 32.6 %). При тех же условиях флотации одним БКК выход минералов составил 80.44 % для галенита и 61.02 % — для сфалерита (разница в выходе минералов 19.42 %), что свидетельствует о более высокой селективности реагента КПДЭ по сравнению с БКК.

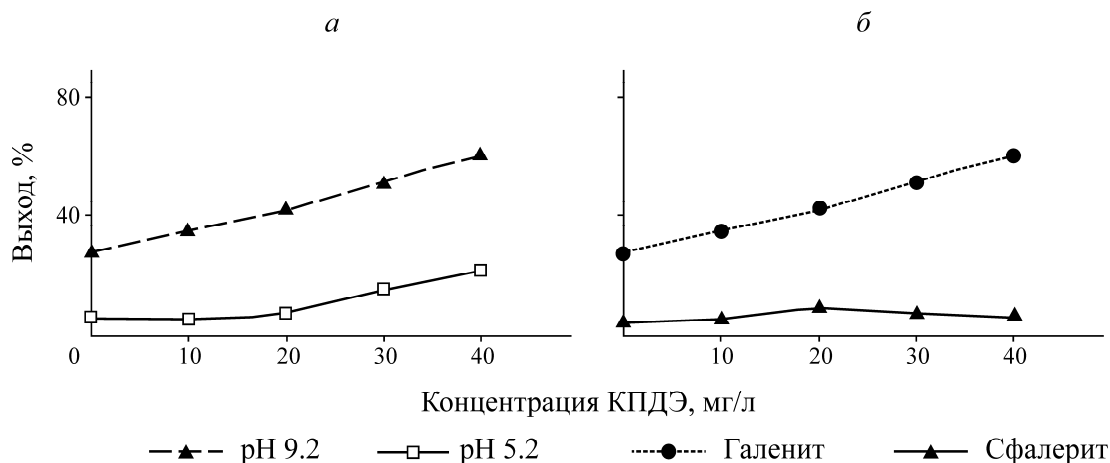


Рис. 9. Результаты мономинеральной флотации галенита с реагентом КПДЭ от pH (а), зависимость выхода галенита и сфалерита от концентрации КПДЭ при pH 9.2 (б)

При совместной подаче реагентов КПДЭ 20 мг/л + БКК 20 мг/л увеличивается разница в извлечении галенита и сфалерита (64.77 %): выход галенита составляет 75.85 %, сфалерита — 11.08 %. Таким образом, реагент КПДЭ обеспечивает селективное флотационное разделение галенита и сфалерита.

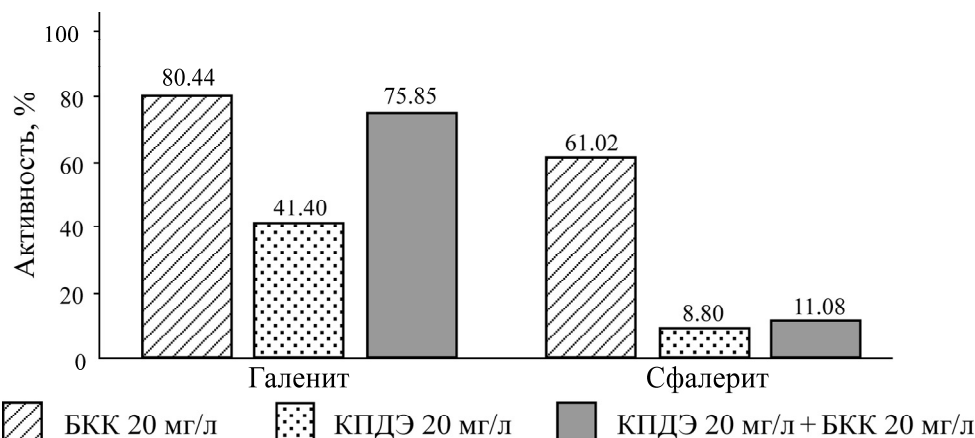


Рис. 10. Диаграмма флотационной активности минералов с БКК, КПДЭ и их сочетанием

ВЫВОДЫ

Исследован новый комплексообразующий реагент/сорбент группы дитиазинов (1-карбокси-2-пергидро-(1,3,5-дитиазин)-5-илэтан) для флотационного разделения галенита и сфалерита. Методами УФ- и ИК-спектроскопии установлена адсорбция реагента на поверхности галенита. Изучение смачиваемости поверхности минералов методами измерения КУС и СЭП показало, что поверхность галенита гидрофобизируется в присутствии КПДЭ, а поверхность сфалерита становится гидрофильной. Сравнительной мономинеральной флотацией выявлено, что реагент КПДЭ более селективен, чем БКК. Сочетание реагентов КПДЭ 20 мг/л + БКК 20 мг/л приводит к увеличению разницы в извлечении галенита и сфалерита (64.77 %), при этом выход галенита составляет 75.85, сфалерита — 11.08 %. Реагент КПДЭ обеспечивает селективное флотационное разделение галенита и сфалерита и может использоваться при флотации свинцово-цинковых руд.

Авторы выражают благодарность ведущему инженеру-технологу АО “Ведущий научно-исследовательский институт химической технологии” Ю. С. Дальновой за предоставление химического реагента для исследования, а также к.т.н. М. В. Рязанцевой, к.г.-м.н. Е. В. Копорулиной, к.г.-м.н. В. А. Минаеву за помощь в проведении ИК-спектроскопических и минералогических исследований методом электронной микроскопии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Распоряжение Правительства РФ** от 30.08.2022 № 2473-р. Официальный интернет-портал правовой информации. [Электронный ресурс] — URL: publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202208310002 (дата обращения 17.11.2022).
2. **Belov S. V., Skripnichenko V. A., and Ushakova V. A.** Mining-geological and economic characteristics of leadzinc ore deposits in the Russian Arctic, Arctic and North, 2022, No. 48. — P. 5–28.
3. **Абрамов А. А.** Флотационные методы обогащения. — М.: МГГУ, Горн. книга, 2008. — 710 с.
4. **Бочаров В. А., Кузьмин В. А., Юшина Т. И., Игнаткина В. А., Хачатрян Л. С., Чантурия Е. Л., Вишкова А. А.** Технологическая оценка основных направлений комплексной переработки упорных полиметаллических руд и продуктов // ГИАБ. — 2014. — № 12. — С. 81–91.
5. **Усманова Н. Ф., Бурдакова Е. А., Бакшеева И. И., Плотникова А. А., Князев В. Н.** Минералогические особенности вещественного состава и технологических свойств труднообогатимых свинцово-цинковых руд // ФТПРПИ. — 2024. — № 1. — С. 155–164.
6. **Кинякин А. И., Климова В. Д., Алгебраистова Н. К., Рулева Д. В., Мусаев О. К.** К оценке возможности использования реагентов-собирателей китайского производства для флотации свинцовой руды. Булатовские чтения. — М.: Изд-во: ООО “ИД Юг”, 2020. — Т. 6. — С. 133–139.
7. **Игнаткина В. А., Бочаров В. А., Дьячков Ф. Г.** Повышение контрастности флотационных свойств сульфидов цветных металлов полиметаллических руд с использованием сульфгидрильных собирателей различной молекулярной структуры руд // ФТПРПИ. — 2014. — № 6. — С. 161–170.
8. **Tan X., Zhu Y. G., Sun C. Y., Zhang X. R., and Su J. F.** Adding cationic guar gum after collector: A novel investigation in flotation separation of galena from sphalerite, *Miner. Eng.*, 2020, Vol. 157. — 106542.
9. **Матвеева Т. Н., Гетман В. В., Каркешкина А. Ю.** Исследование взаимодействия поливинилкапролактама, модифицированного морфолиндитиокарбаматом с золотосодержащими минералами, входящими в состав поликомпонентных руд // Изв. ТулГУ. Науки о Земле. — 2024. — № 4. — С. 293–307.
10. **Матвеева Т. Н., Громова Н. К., Ланцова Л. Б.** Перспективные реагенты для извлечения стратегических металлов из труднообогатимого минерального сырья // Зап. Горн. ин-та. — 2024. — Т. 269. — С. 757–764.
11. **Матвеева Т. Н., Гетман В. В., Каркешкина А. Ю.** Исследование адсорбционных и флотационных характеристик реагента дитиопириметана для извлечения золота из упорных золотомышьяковых руд // ФТПРПИ. — 2020. — № 4. — С. 157–163.
12. **Матвеева Т. Н., Чантурия В. А., Гетман В. В., Каркешкина А. Ю., Громова Н. К.** Применение нового композиционного реагента для флотационного выделения целевых минералов в коллективный медно-молибденовый концентрат // ГИАБ. — 2021. — № 11. — С. 80–94.
13. **Chanturiya V. A., Matveeva T. N., Getman V. V., Karkeshkina A. Y., and Gromova N. K.** Substantiation of new reagent compositions for the effective extraction of rhenium in the processing of complex molybdenum ores, *Minerals*, 2023, Vol. 13. — 372.

14. Пат. 2102508 РФ. Способ извлечения золота и палладия из растворов / Алеев Р. С., Дальнова Ю. С., Аксеенко Р. И. и др. // Оpubл. в БИ. — 1998. — № С1.
15. Пат. 2134307 РФ. Способ извлечения благородных металлов из растворов / Алеев Р. С., Дальнова Ю. С., Аксеенко Р. И. и др. // Оpubл. в БИ. — 1999. — № С1.
16. Пат. 2490070 РФ. Способ флотации сульфидных руд, содержащих благородные металлы / Чантурия В. А., Иванова Т. А., Дальнова Ю. С., Недосекин Т. В., Гапчич А. О., Зимбовский И. Г. // Оpubл. в БИ. — 2012. — № С1.
17. Гетман В. В., Гапчич А. О. Использование реагента МТХ при флотации мышьяковистых золотосодержащих руд // Обогащение руд. — 2014. — № 5. — С. 22–26.
18. Гапчич А. О. Использование собирателя класса дитиазинов при флотации золотосодержащих руд // ГИАБ. — 2015. — № 6. — С. 353–360.
19. Zhang Z., Sun Q., Liu S., Lu Z., Niu X., Ahmed M. M. M., and Liu G. The selective flotation separation of galena from sphalerite with a novel collector of 5-amyl-1, 2, 4-triazole-3-thione, J. Molecular Liquids, 2021, Vol. 332. — 115902.
20. Хорозова О. Д., Дальнова Ю. С., Бабкин А. В., Мельникова И. М., Трясцина А. С., Шукман Е. С. Синтез и физико-химические свойства 1-карбокси-2-/пергидро(1,3,5-дитиазин)/-5-илэтана при сорбции тяжелых, благородных и редкоземельных элементов // Сорбционные и хроматографические процессы. — 2024. — Т. 24. — № 1. — С. 76–87.
21. Rudawska A. and Jacniacka E. Analysis for determining surface free energy uncertainty by the Owen–Wendt method, Int. J. Adhesion Adhesives, 2009, No. 4, Vol. 29. — P. 451–457.
22. Xing Y., Xu M., Gui X., Cao Y., Rudolph M., Butt H. J., and Kappl M. The role of surface forces in mineral flotation, Current Opinion Colloid Interface Sci., 2019, Vol. 44. — P. 143–152.
23. Александрова Т. Н., Афанасова А. В., Кузнецов В. В., Абурова В. А. Выбор параметров флотации сульфидных медно-никелевых руд на основе анализа распределения компонентов по флотируемости // ГИАБ. — 2022. — № 1. — С. 131–147.

Поступила в редакцию 11/IV 2025

После доработки 06/V 2025

Принята к публикации 16/V 2025