ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021;(11):80-94
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.7 DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_0_80

ПРИМЕНЕНИЕ НОВОГО КОМПОЗИЦИОННОГО РЕАГЕНТА ДЛЯ ФЛОТАЦИОННОГО ВЫДЕЛЕНИЯ ЦЕЛЕВЫХ МИНЕРАЛОВ В КОЛЛЕКТИВНЫЙ МЕДНО-МОЛИБДЕНОВЫЙ КОНЦЕНТРАТ

Т.Н. Матвеева[1], В.А. Чантурия[1], В.В. Гетман[1], А.Ю. Каркешкина[1], Н.К. Громова[1]

[1] ИПКОН РАН, Москва, Россия, e-mail: viktoriki.v@gmail.com

Аннотация: В качестве селективного реагента-собирателя для флотационного извлечения Cu и Mo в коллективный Cu-Mo концентрат исследован новый композиционный реагент КР, представляющий собой тонкоэмульгированный раствор керосина с S-P-содержащим компонентом. Электронодонорные атомы серы и фосфора в структуре реагента предопределяет его склонность к комплексообразованию и избирательной адсорбции, а алкильные радикалы обеспечивают высокую собирательную активность по отношению к извлекаемым сульфидам Cu и Mo. Методами УФ-спектрофотометрии (SHIMADSU 1800), лазерной (KEYENCE VK-9700) и аналитической сканирующей электронной (LEO 1420VP INCA OXFORD ENERGY 350) микроскопии идентифицирована адсорбция КР на халькопирите и молибдените. Установлен индивидуальный характер формирования адсорбционного слоя на каждом из перечисленных сульфидных минералов с образованием игольчатых кристаллов реагента, равномерно распределенных по поверхности молибденита и халькопирита. Важным преимуществом композиционного реагента по сравнению с традиционными реагентами-собирателями является его индифферентность по отношению к пириту, что положительно влияет на качество коллективного медно-молибденового концентрата. Применение композиционного реагента в цикле коллективной флотации увеличивает извлечение молибдена на 2,75% и меди на 13,61% в концентрат, при этом сокращаются потери ценных компонентов с отвальными хвостами.

Ключевые слова: флотация, адсорбция, микроскопия, медно-молибденовые руды, халькопирит, молибденит, собиратель, композиционный реагент.

Благодарность: Работа выполнена при финансовой поддержке проекта Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования РФ № 13.1902.21.0018 (соглашение 075-15-2020-802).

Для цитирования: *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 // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 11. – С. 80–94. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_0_80.

Application of composite reagent for flotation of target minerals in bulk copper–molybdenum concentrate

T.N. Matveeva[1], V.A. Chanturiya[1], V.V. Getman[1], A.Yu. Karkeshkina[1], N.K. Gromova[1]

[1] Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, e-mail: viktoriki.v@gmail.com

© Т.Н. Матвеева, В.А. Чантурия, В.В. Гетман, А.Ю. Каркешкина, Н.К. Громова. 2021.

Abstract: A composite reagent CR represented by delicately emulsified solution of kerosene with S–P-bearing components is studied as a new selective collector for flotation of Cu and Mo in bulk concentrate. The electron-donating atoms of sulfur and phosphorus in the structure of the reagent govern its predisposition to complexing and selective adsorption, while the alkyl radicals ensure high collectability relative to Cu and Mo sulfides. Using the methods of UV spectrophotomery (SHIMADSU 1800), laser spectroscopy (KEYENCE VK-9700) and scanning electron microscopy (LEO 1420VP INCA OXFORD ENERGY 350), adsorption of CR at chalcopyrite ad molybdenite is identified. The adsorption layer formed on these sulfide minerals is very specific, with uniform distribution of needle-shaped crystals of the reagent over chalcopyrite and molybdenite surface. A critical advantage of the composite reagent over conventional collectors is its indifference to pyrite, which is beneficial for the quality of the bulk copper–molybdenum concentrate. The application of the composite reagent in the bulk flotation cycle increases molybdenum and copper recovery in concentrate by 2.75 and 13.61%, respectively, at the reduced loss of the valuable components in tailings.

Key words: flotation, adsorption, microscopy, copper–molybdenum ore, chalcopyrite, molybdenite, collector, composite reagent.

Acknowledgements: The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Project No. 13.1902.21.0018, Agreement No. 075-15-2020-802.

For citation: Matveeva T. N., Chanturiya V. A., Getman V. V., A.Yu. Karkeshkina, Gromova N. K. Application of composite reagent for flotation of target minerals in bulk copper–molybdenum concentrate. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(11):80-94. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_0_80.

Введение

В настоящее время основным источником получения молибдена в России являются медно-молибденовые руды с содержанием от 0,059% до 0,1% Mo. Медно-молибденовые руды перерабатывают, как правило, по схеме коллективной флотации с последующим разделением коллективного концентрата на медный и молибденовый. Молибденит, как основной минерал молибдена, обладает высокой природной гидрофобностью, превышающей гидрофобность сопутствующих минералов, практически не смачивается водой, легко взаимодействует с углеводородными маслами и хорошо флотируется при pH 8—8.5.

Типичными собирателями для молибденита являются аполярные углеводородные реагенты — керосин, трансформаторное масло, машинные масла и др. Применяются также ксантогенаты и аэрофлоты.

В мировой добыче меди и молибдена месторождения порфирового типа занимают ведущее положение. В общих запасах меди промышленно развитых стран на долю порфировых руд приходится около 65%. По уровню запасов молибдена Россия уступает только Китаю, США, Чили и Перу. Основу российской сырьевой базы молибдена, в отличие от мировой, составляют собственно молибденовые штокверковые месторождения, в которых заключено почти 80% балансовых запасов страны. На долю медно-порфировых месторождений, содержащих молибден в качестве попутного компонента, приходится всего около 9% балансовых запасов России.

В большинстве молибденовых концентратов содержится рений. В промышленности сырьевыми источниками рения (на 80%) являются молибденовые и медные сульфидные концентраты. При обогащении медно-молибденовых руд рений следует за молибденом, который сам часто является попутчиком меди. При флотации до 80% рения попадает в концентрат. Так, молибденовые концентраты, получаемые при обогащении медно-порфировых руд, содержат 0,02—0,17% рения. Комплексное извлечение ценных компонентов — основная цель рационального недропользования.

Медно-молибденовые руды характеризуются сравнительно крупной вкрапленностью молибденита и пирита, а также наличием тонковкрапленных минералов меди. При обогащении медно-молибденовых руд получают медные концентраты с содержанием 21—32% меди при извлечении 75—95% и молибденовые концентраты с содержанием 40—57% молибдена при извлечении от 45—55% до 80—86% [1]. В настоящее время добычу и переработку молибденсодержащих руд осуществляет Сорский ГОК. Получаемый молибденовый концентрат в полном объеме перерабатывается с получением ферромолибдена.

При флотации медно-молибденовых руд в качестве собирателя для медных минералов применяют ксантогенаты, дитиофосфаты. Эти реагенты эффективно извлекают и молибденовые минералы. Пирит депрессируют известью при pH 9—11,5 [2—13].

Коллективом ООО «Института Гипроникель» были протестированы руды Орекитканского и Ак-Сугского месторождений. Среди испытываемых реагентов (собирателей № 79, Aero MX 3601 и МБХ) и вспенивателей (ОПСБ и DSF-004) по результатам исследований в качестве наиболее эффективных рекомендованы Aero MX 3601 и ОПСБ. При сравнении ксантогената и Aero MX 3601 в системе «суммарная эффективность обогащения Cu и Mo — расход собирателя» оказалось, что Aero MX 3601 значительно слабее ксантогената [14].

Коллективом «Института Гинцветмет» совместно с предприятием «Эрдэнэт» опробована технология коллективной флотации с использованием модифицированных аэрофлотов. В результате полупромышленных испытаний зафиксировано повышение извлечения меди и молибдена в коллективный концентрат с применением изобутилового аэрофлота.

По данным [15] при обогащении медно-молибденовых руд месторождения «Эрдэнэтийн-Овоо» (Монголия) внедрен новый собиратель AERO MX-5140 (на основе аллилового эфира амилксантогеновой кислоты и тионокарбамата) и предложен способ оптимизации соотношения расходов собирателей AERO MX-5140 и BK-901 в коллективной флотации в зависимости от относительного содержания первичных и вторичных сульфидов меди в руде.

Одной из наиболее важных проблем при обогащении медно-молибденовых руд является снижение потерь меди, молибдена и других ценных металлов с хвостами коллективной флотации и шламами при выделении медного концентрата, которые составляют 25—30% и более. Так, на Сорской ОФ суммарные потери меди с отвальными хвостами коллективной флотации и шламами могут превышать 50% при низком содержании Cu и Mo в исходной руде.

Анализ литературных данных показал, что высокие потери ценных компонентов являются следствием непостоянства вещественного состава руды, неравномерного соотношения халькопирита и молибденита, роста доли первичных сульфидов меди и тонковкрапленного молибденита, наличия флотоактивного

Таблица 1

Химический состав образцов сульфидных минералов
Chemical composition of samples of sulfide minerals

Содержание, %				
Минералы	**Mo**	**Cu**	**Fe**	**S**
Молибденит	59,41	—	—	39,09
Халькопирит	—	32,543	30,00	34,39
Пирит	—	—	46,6	53,4

пирита [5—8, 14—19]. Высокие показатели извлечения ценных компонентов в коллективный концентрат могут быть достигнуты применением новых композиций флотационных реагентов, селективно изменяющих гидрофобные свойства целевых минералов.

В качестве реагента-собирателя для наиболее полного флотационного извлечения Cu и Mo в коллективный концентрат в работе исследован новый композиционный реагент (КР), представляющий собой тонкоэмульгированный раствор керосина с диалкилдитиофосфинатом (S-P-содержащим реагентом). В отличие от известных в практике флотации S-P-O-содержащих реагентов (дитиофосфаты), которые применяются при флотации руд цветных и благородных металлов с высоким содержанием пирита [16—19], данный реагент обладает высокой селективностью к целевым минералам.

Цель работы — исследование нового композиционного реагента КР в качестве собирателя минералов меди и молибдена для флотационного выделения целевых минералов в коллективный концентрат и сокращения потерь ценных металлов с хвостами коллективной флотации.

Материалы и методы исследования

Исследования проводили на мономинеральных фракциях молибденита, халькопирита и пирита крупностью –0,1+0,063 мм — флотационные испытания, –0,063+0,044 мм — оценка адсорбции реагентов методом УФ-спектроскопии. Методом аналитической сканирующей электронной и лазерной микроскопии изучали адсорбцию реагентов на минеральных частицах молибденита размером 4x8 мм, аншлифах пирита и халькопирита размером 1×1 см.

Химический анализ минералов, руды и продуктов их флотации выполнен в сертифицированной лаборатории ООО «Стюарт Геокемикл энд Эссей». Основные элементы определялись методом окислительного разложения с последующим атомно-эмиссионным анализом с индуктивно связанной плазмой (ME-ICPORE).

Химический состав образцов сульфидных минералов, отобранных для проведения экспериментальных исследований, представлен в табл. 1.

В качестве рудного объекта в работе использовали пробу медно-молибденовой порфировой руды, входящей в состав Находкинского рудного поля (Чукотка). Химический состав пробы медно-молибденовой руды месторождения «Находка» представлен в табл. 2. Ситовая характеристика руды после измельчения представлена в табл. 3.

В качестве реагентов использовали керосин, бутиловый ксантогенат калия (БКК), раствор керосина с БКК и композиционный реагент (КР). КР — это новый флотационный реагент на основе тонкоэмульгированного раствора керо-

Таблица 2

Химический состав пробы медно-молибденовой руды месторождения «Находка»
Chemical composition of copper–molybdenum ore sample from Nakhodka deposit

Компоненты	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	As	S	Fe	Mo
	г/т		%						
Количество	1,09	2,17	0,54	0,025	0,01	0,073	1,41	3,43	0,0053

Таблица 3

Ситовая характеристика измельченной медно-молибденовой руды месторождения «Находка»
Sizing curve of milled copper–molybdenum ore from Nakhodka deposit

Класс, мм	+0,1	–0,1+0,071	–0,071+0,063	–0,063+0,044	–0,044	итого
Выход, %	7,52	19,75	2,99	10,77	58,97	100,00

сина диалкилдитиофосфинатом (S-P-содержащим компонентом), обладающий селективными собирательными свойствами по отношению к сульфидам меди и молибдена. Электронодонорные атомы серы и фосфора в структуре реагента предопределяет его склонность к комплексообразованию и избирательной адсорбции, а алкильные радикалы обеспечивают высокую собирательную активность по отношению к извлекаемым сульфидам Cu и Mo.

Формирование адсорбционного слоя флотационных реагентов с поверхностью минеральных образцов анализировали методом аналитической сканирующей электронной микроскопии (ASEM) на микроскопе LEO 1420VP, оснащенном рентгеновским энергодисперсионным микроанализатором INCA 350, и лазерном микроскопе KEYNCE VK-9700 в аналитическом центре изучения природного вещества ИПКОН РАН. Анализ позволяет по наличию и интенсивности пиков поглощения идентифицировать присутствие минеральных и органических фаз на минеральной поверхности в исходном состоянии и после контакта с реагентами.

УФ-спектрофотометрическим методом была выполнена качественная и количественная оценка адсорбции реагентов-собирателей на сульфидных минералах. Количественная оценка выполнена в соответствии с законом Буггера-Ламберта-Бера. Оптическую плотность растворов реагентов до и после контакта с минералами измеряли на спектрофотометре UV-1800 Shimadzu, который позволяет получать данные в виде графически выполненного спектра и в виде цифровых значений максимумов и минимумов поглощения с указанием длины волны в области поглощения 200×
×300 нм.

Адсорбцию композиционного реагента КР на сульфидных минералах определяли по разнице исходной и остаточной концентрации реагента в жидкой фазе минеральной суспензии при длине волны 232 нм. Навеску минерала крупностью –0,063+0,044 мм и массой 1 г помещали в стеклянный стакан, добавляли 25 мл раствора реагента различной концентрации (5, 10, 15 и 20 мг/л), перемешивали 5 мин, отстаивали, после чего раствор отфильтровывали и анализировали на спектрометре.

Исследование флотируемости минералов молибдена, меди и железа проводили методом флотации в лабораторной флотомашине с объемом камеры 20 мл при различной концентрации реагентов от 0 мг/л до 3 мг/л. Масса навески — 1 г,

время флотации — 1 мин, pH пульпы мономинеральной флотации пирита — 6,9, халькопирита — 7,2 и молибденита 8,2. В качестве вспенивателя применяли сосновое масло.

Рудную флотацию проводили в следующих условиях: навеску 250 г измельчали в лабораторной в шаровой мельнице марки «62 МЛ» до крупности 70% — 0,071 мм (Т:Ж:Ш-1:0,5:6) и флотировали в лабораторной механической флотомашине МЕХАНОБР (0,75 л). Флотационные испытания реагентов-собирателей проводили в цикле коллективной флотации медно-молибденовой руды в одну стадию.

Условия сульфидной флотации: pH 8, собиратели — керосин, бутиловый ксантогенат (БутХ) и композиционный реагент (КР), вспениватель — сосновое масло, время флотации — 8 мин, время перемешивания с реагентами — по 1 мин с каждым. Расход реагентов — переменный.

Результаты и обсуждение

Результаты электронной и лазерной микроскопии

Морфология и элементный состав поверхности молибденита исследованы до и после обработки КР, фотографии и рентгеновские спектры представлены на рис. 1.

Методом ASEM установлено, что на поверхности молибденита до обработки реагентом посторонних соединений не обнаружено, поверхность минерала чистая (рис. 1, *а*), что подтверждается энер-

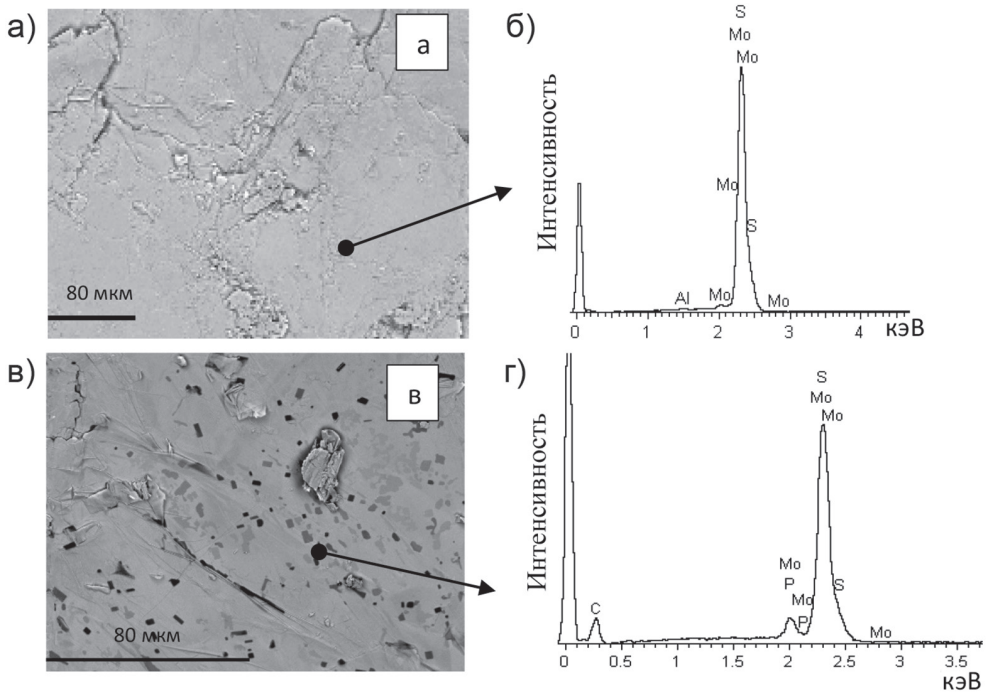

Рис. 1. ASEM снимок поверхности молибденита (а) и энергодисперсионный спектр (б) до обработки реагентом КР и снимок поверхности молибденита (в) и энергодисперсионный спектр (г) после обработки реагентом КР

Fig. 1. ASEM image (a) and energy dispersive spectrum (b) of molybdenite surface before treatment with CR; ASEM image (c) and energy dispersive spectrum (d) of molybdenite surface after treatment with CR (CR — composite reagent)

годисперсионным спектром (рис. 1, *б*). После обработки молибденита реагентом КР на поверхности минерала (рис. 1, *в*) появляются новообразованные фазы реагента в виде темных пластинок правильной формы, равномерно распределенных на поверхности молибденита. Пики фосфора, углерода и серы (рис. 1, *г*) в энергодисперсионном спектре вновь образованных фаз указывают на закрепление реагента КР на поверхности молибденита.

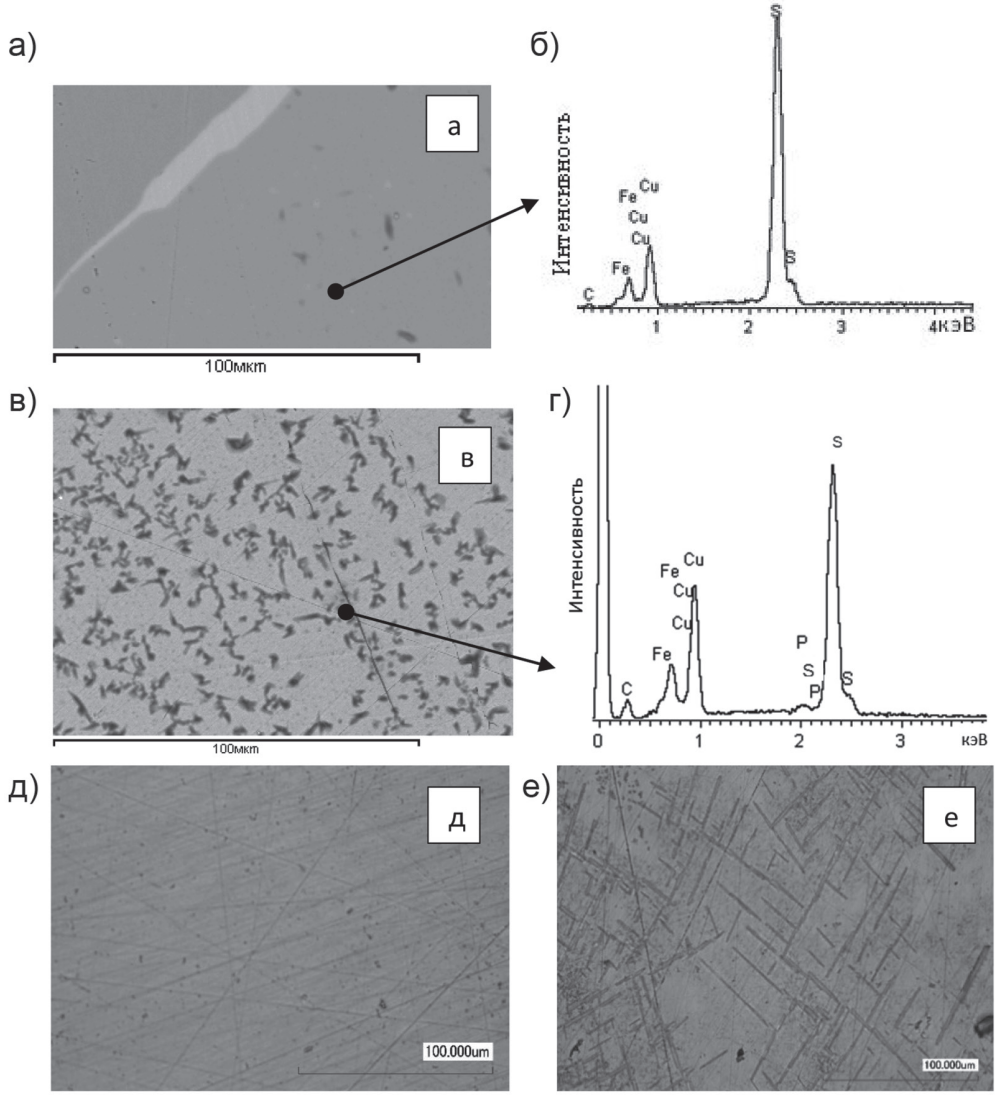

Рис. 2. ASEM снимок поверхности халькопирита (а) и энергодисперсионный спектр до обработки (б); ASEM снимок поверхности халькопирита (в) и энергодисперсионный спектр после обработки КР (г); изображение поверхности халькопирита, полученное с помощью лазерного микроскопа до обработки (д) и после обработки (е)

Fig. 2. ASEM image (a) and energy dispersive spectrum (b) of chalcopyrite surface before treatment with CR; ASEM image (v) and energy dispersive spectrum (g) of chalcopyrite surface after treatment with CR; laser microscope image of chalcopyrite surface before (d) and after (e) CR treatment

На лазерном и аналитическом сканирующем электронном микроскопе исследована поверхность халькопирита до и после обработки реагентом КР (рис. 2).

Как видно на снимках (рис. 2, *а*, *д*), поверхность халькопирита до обработки КР чистая, на энергодисперсионном спектре присутствуют пики, характерные для данного минерала (Cu, Fe и S) (рис. 2, *б*). После обработки поверхности халькопирита реагентом КР появились новообразования в виде игольчатых кристаллов реагента, равномерно распределенных по поверхности минерала (рис. 2, *в*, *е*). Пики фосфора и серы в энергодисперсионном спектре участка поверхности с адсорбированным реагентом (рис. 2, *г*) указывают на закрепление S-P-содержащего компонента на поверхности халькопирита.

Было также исследована поверхность пирита до и после обработки реагентом КР. После обработки на поверхности минерала не обнаружено новых соединений, о чем свидетельствовал энергодисперсионный спектр поверхности после обработки.

Результаты УФ-спектроскопии

Методом УФ-спектроскопии показана зависимость адсорбции КР от концентрации реагента в растворе (рис. 3). По разнице исходной и остаточной концентрации реагента в соответствии с законом Буггера-Ламберта-Бера рассчитана величина адсорбция КР из водного раствора с концентрацией 5 мг/л на молибдените после 5 мин контакта минерала с раствором реагента.

Предварительно было установлено, что в спектрах керосина поглощение в области длин волн 200—300 нм отсутствует, следовательно, наличие керосина в растворе не приводит к искажению спектра КР. На спектре КР в области 232 нм отмечены пики при концентрации КР 5, 10, 15 и 20 мг/л, характерные для фосфорсодержащего соединения (рис. 3, *а*).

Исследование сорбции КР на образцах молибденита, халькопирита и пирита (рис. 3, *б*) указывает на избирательное воздействие на минералы. При концентрации КР 5 мг/л адсорбция на халькопирите и молибдените возраста-

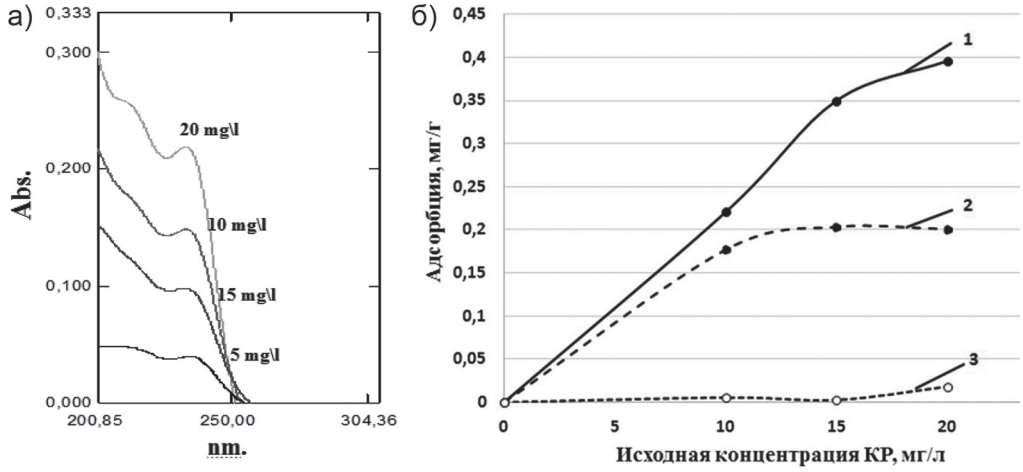

Рис. 3. Спектр композитного реагента в УФ-области при разной концентрации (а); адсорбция композиционного реагента на минералах: 1 — молибдените, 2 — халькопирите и 3 — пирите (б)

Fig. 3. UV range spectrum of composite reagent at different concentrations (a); CR adsorption at: 1 — molybdenite; 2 — chalcopyrite; 3 — pyrite (b)

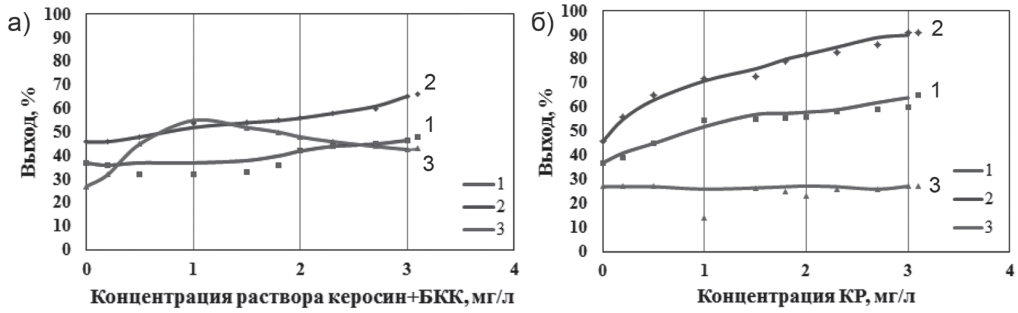

Рис. 4. Зависимости выхода минералов в концентрат от концентрации раствора керосин+БКК (а), и композиционного реагента (б) в жидкой фазе пульпы: 1 — выход молибденита; 2 — выход халькопирита; 3 — выход пирита

Fig. 4. Yield of minerals in concentrate versus concentration of (a) kerosene + potassium butyl xanthate solution and (b) composite reagent in pulp liquid phase: 1 — molybdenite; 2 — chalcopyrite; 3 — pyrite

ет до 0,1 — 0,11 мг/г, в то время как на пирите адсорбция реагента отсутствует. С увеличением концентрации КР в растворе адсорбция на минералах халькопирита и молибденита продолжает увеличиваться, на молибдените адсорбция растет с увеличением концентрации КР до 20 мг/л и составляет 0,39 мг/г, а на халькопирите увеличивается до 0,2 мг/г при концентрации 15 мг/л КР и остается на этом же значении при концентрации 20 мг/л. Сорбционная активность реагента КР по отношению к халькопириту и молибдениту обусловлена образованием на поверхности минералов прочных комплексных соединений. На всем интервале изменения концентрации КР (0 — 20 мг/л) адсорбция на поверхности пирита не зафиксирована.

Результаты мономинеральной флотации

На рис. 4 показана зависимость выхода минералов меди, молибдена и железа от концентрации растворов реагентов. В качестве базового опыта проводили флотацию с эмульгированным раствором керосина с БКК (рис. 4, *а*) и сравнивали его с результатами опыта, полученными с использованием композиционного реагента (рис. 4, *б*).

Как видно на рис. 4, *а*, с увеличением концентрации собирателей керосин + БКК от 0 до 3 мг/л увеличивается выход молибденита на 6,5%, халькопирита на 20,2%. Выход пирита резко возрастает с 27% до 55% при концентрации смеси собирателей 1 мг/л, а с увеличением концентрации до 3 мг/л выход снижается до 43%, что, вероятно, связано с отрицательным воздействием избыточного количества БКК на 1 г минерала.

На рис. 4, *б* при использовании в качестве собирателя реагента КР показано, что выход молибденита и халькопирита увеличивается уже при концентрации реагента 1 мг/л и составляет 71,8% и 54,8% соответственно. С увеличением концентрации КР до 3 мг/л выход халькопирита составляет 91%, а молибденита — 65%. При этом выход пирита практически не изменяется и остается на достаточно низком уровне — около 27%.

Анализ кривых зависимостей показал, что применение традиционных реагентов — керосин и БКК (рис. 4, *а*) — оказывается не эффективным: извлечение сульфидов меди и молибдена низкое, при этом повышается извлечение пирита, что приводит к ухудшению качества коллективного концентрата в процессе

флотации и потерям ценных компонентов. Применение нового композиционного реагента-собирателя КР позволяет повысить извлечение сульфидов Cu и Mo до 70% и 90% соответственно. Важным преимуществом композиционного реагента КР по сравнению с традиционными реагентами-собирателями является его индифферентность по отношению к пириту, что положительно влияет на качество коллективного концентрата.

Таким образом, новый флотационный композиционный реагент проявляет селективные и собирательные свойства по отношению к сульфидам меди и молибдена.

Применение реагента КР в цикле коллективной флотации позволит увеличить извлечение молибдена и меди в концентрат, повышая его качество, что сократит потери ценных компонентов с отвальными хвостами.

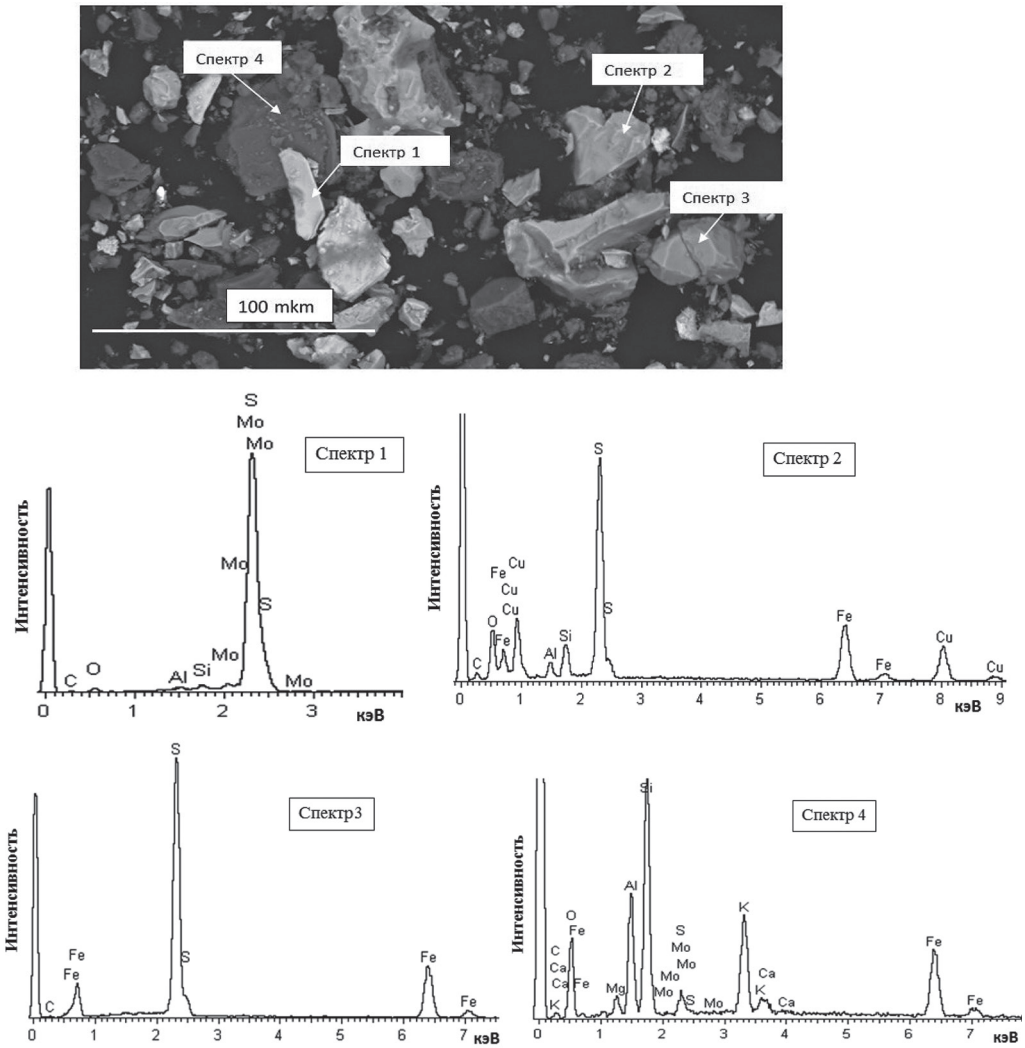

Рис. 5. ASEM изображение пробы руды месторождения «Находка» и энергодисперсионные спектры минералов (LEO 1420VP INCA 350)

Fig. 5. ASEM image of Nakhodka ore sample and energy dispersive spectra of minerals (LEO 1420VP INCA 350)

Флотация медно-молибденовой руды

Рудная флотация проводилась на пробе медно-молибденовой порфировой руды. Морфология и элементный состав пробы руды исследованы методом сканирующей электронной микроскопии на аналитическом сканирующем электронном микроскопе (ASEM) LEO 1420VP, оснащенном рентгеновским энергодисперсионным микроанализатором INCA 350 (рис. 5).

Исследование показало, что основные сульфидные минералы в пробе представлены молибденитом (спектр 1), халькопиритом (спектр 2), пиритом (спектр 3) и породообразующими минералами. Молибденит находится преимущественно в сростках с кварцем, силикатами и другими породообразующими минералами (спектр 4).

Флотационные испытания реагентов-собирателей проводили в цикле коллективной флотации медно-молибденовой руды.

Измельченную пробу помещали во флотационную камеру объемом 750 мл. В качестве базового опыта был принят стандартный реагентный режим с применением традиционных собирателей — БКК 10 г/т и керосин 10 г/т. Испытание композиционного реагента проводили совместно с БКК при расходах от 5 до 20 г/т в соотношении 1:1. Время контакта с каждым реагентом 1 мин, время флотации 8 мин. Флотация проводилась в 1 стадию в открытом цикле. Продукты флотации анализировали на интегрированном EDXRF-анализаторе Olympus X-5000. Технологические показатели рудной флотации представлены в табл. 4.

В результате флотационных экспериментов установлено, что при стандартном реагентном режиме (БКК 10 г/т, керосин 10 г/т) содержание меди в концентрате составило 3,17%, молибдена 0,0351% при извлечении меди 83,72% и извлечении молибдена 82,31%. Замена

Таблица 4

Технологические показатели рудной флотации Cu-Mo руды
Cu–Mo ore flotation performance

Условия опыта	Продукты	Выход, %	Содержание, %		Извлечение, %	
			Cu	Mo,	Cu	Mo
жидкое стекло 200 г/т БКК 10 г/т керосин 10 г/т сосновое масло 50 г/т	концентрат	14,54	3,17	0,0351	83,72	82,31
	хвосты	85,46	0,10	0,0013	16,28	17,69
	исходное	100,00	0,55	0,0062	100,00	100,00
жидкое стекло 200 г/т БКК 5 г/т КР 10 г/т сосновое масло 50 г/т	концентрат	13,75	4,11	0,0354	89,12	83,95
	хвосты	86,25	0,08	0,0011	10,88	16,05
	исходное	100,00	0,63	0,0058	100,00	100,00
жидкое стекло 200 г/т БКК 10 г/т КР 10 г/т сосновое масло 50 г/т	концентрат	13,81	3,74	0,0366	90,64	84,22
	хвосты	86,19	0,06	0,0011	9,36	15,78
	исходное	100,00	0,57	0,0060	100,00	100,00
жидкое стекло 200 г/т БКК 20 г/т КР 20 г/т сосновое масло 50 г/т	концентрат	13,26	4,33	0,0372	97,33	85,06
	хвосты	86,74	0,02	0,0010	2,67	14,94
	исходное	100,00	0,59	0,0058	100,00	100,00

керосина на композиционный реагент КР при сниженном в 2 раза расходе ксантогената привела к увеличению извлечения меди на 5,4% при повышении качества концентрата по меди до 4,11%. Максимальный прирост извлечения меди до 97,33% и молибдена до 85,06% наблюдался при расходах ксантогената и КР по 20 г/т каждого реагента, при этом отмечены наименьшие потери целевых металлов с хвостами флотации.

Таким образом, применение нового композиционного реагента (КР) в цикле коллективной флотации позволяет получить более богатый по содержанию меди и молибдена коллективный концентрат, повысить извлечение меди на 13,61%, молибдена на 2,75% и сократить потери ценных компонентов с хвостами флотации.

Выводы

Предложен новый флотационный реагент на основе тонкоэмульгированного раствора керосина с S-P-содержащим компонентом, обладающий селективными собирательными свойствами по отношению к сульфидам меди и молибдена. Электронодонорные атомы серы и фосфора в структуре реагента предопределяют его склонность к комплексообразованию и избирательной адсорбции, а алкильные радикалы обеспечивают высокую собирательную активность по отношению к извлекаемым сульфидам Cu и Mo. В отличие от известных в практике флотации дитиофосфатов, которые применяют при флотации руд цветных и благородных металлов с высоким содержанием пирита, данный реагент обладает высокой селективностью к целевым минералам.

Методами УФ-спектрофотометрии, аналитической сканирующей электронной и лазерной микроскопии экспериментально установлена адсорбционная активность реагента по отношению к халькопириту и молибдениту. Индифферентность КР к пириту обеспечивает селективное выделение целевых минералов в коллективный Cu-Mo концентрат.

Применение реагента КР в цикле коллективной флотации приводит к повышению извлечения молибдена и меди в концентрат, чем улучшает его качество, и сокращению потерь целевых металлов с хвостами обогащения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Методические* рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Молибденовые руды. Распоряжение МПР России от 05.06.2007 № 37-р. — М.: МПР РФ, 2007. — 37 с.

2. *Abramov A. A.* Physico-chemical modeling of flotation systems // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 1998, vol. 19, no. 1, pp. 409–459. Published online: 28 Nov 2010.

3. *Abramov A. A.*, *Forsberg K. S.* E. Chemistry and optimal conditions for copper minerals flotation: Theory and practice // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2005, vol. 26, no. 2, pp. 77–143.

4. Bakalarz A., Gloy G., Luszczkiewicz A. Flotation of sulfide components of copper ore in the presence of n-Dodecane // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2015, vol. 36, no. 2, pp. 103–111. Published Online: 25 Sep 2014.

5. *Бухоров Ш. Б.*, *Хайдаров А. А.*, *Хамраев С. С.*, *Халматов М. М.* Совместное использование флотационных реагентов при флотации медно-молибденовых руд // Горный журнал. — 2009. — № 1. — С. 49–51.

6. *Рудчеканова Л. Г.*, *Радушев А. В.*, *Байгачева Е. В.*, *Чернова Г. В.* Новые собиратели для флотации сульфидных руд // Обогащение руд. — 2009. — № 1. — С. 34–36.

7. *Абрамов А. А.* Технология переработки и обогащения руд цветных металлов. Т. 3. Книга 1. — М.: Изд-во «Горная книга», 2005. — 575 с.

8. *Gül A.* The role of $Na_2S_2O_5$ and activated carbon on the selective flotation of chalcopyrite from a copper ore using a dithiophosphine-type collector // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2007, vol. 28 no. 3, pp. 235–245. Published Online: 07 May 2007.

9. *Zhang Y., Tang Z., Shirokoff J.* Study on flotability and surface oxidation of sulfide minerals from the tailing of an iron-copper mine using electron probe microanalyzer // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2019. Published Online: 25 Dec 2019. DOI: 10.1080/ 08827508.2019.1707675.

10. *Matveeva T. N.*, *Chanturiya V. A.*, *Getman V. V.*, *Gromova N. K.*, *Ryazantseva M. V.*, Karkeshkina A. Yu., *Lantsova L. B.*, *Minaev V. A.* The effect of complexing reagents on flotation of sulfide minerals and cassiterite from tin-sulfide tailings // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2020. Published Online: 21 Dec 2020. DOI: 10.1080/08827508.2020.1858080.

11. *Bakalarz A.* Chemical and mineral analysis of flotation tailings from stratiform copper ore from lubin concentrator plant (SW Poland) // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2019, vol. 40, no. 6, pp. 437–446. Published Online: 27 Sep 2019.

12. *Chanturia V. A.*, *Ivanova T. A.*, *Getman V. V.*, *Koporulina E. V.* Methods of minerals modification by the micro- and nanoparticles of gold and platinum for the evaluation of the collectors selectivity at the flotation processing of noble metals from the fine ingrained ores // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2015, vol. 36, no. 5, pp. 288–304.

13. *Бобракова А. А.* Обоснование реагентного режима сульфидной флотации молибденсодержащих руд алюмосиликатного состава // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2013. — № 12. — С. 298 — 301.

14. *Карнаухов С. Н.*, *Плясовица С. С.*, *Вилкова Н. В.* Технология переработки молибденсодержащих руд // Цветные металлы. — 2011. — № 8/9. — С. 55–61.

15. *Дэлгэр Р.* Исследование и разработка эффективной технологии, обеспечивающей повышение извлечения молибдена при обогащении медно-молибденовых руд месторождения «Эрдэнэтийн-Овоо» (Монголия), в условиях изменения минерального состава: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М.: ГИНЦВЕТМЕТ, 2012. — 23 с.

16. *Grujic M., Salatić D., Djurkoyić I.*, *Grujić M. M.* Flotability of copper, gold and platinum minerals in function of liberation rate and applied collector // Journal of Mining and Metallurgy A: Mining. 2004, vol. 40, no. 1, pp. 33 — 47.

17. *Farinato R. S.*, *Nagaraj L. R.* Time dependent wettabiliti of mineral and metal surfaces in the presence of thiol surfactants // Journal of adhesion science and technology, vol. 6, no. 12, pp. 1331–1345.

18. *Бочаров В. А.*, *Хачатрян Л. С.*, *Игнаткина В. А.*, Баатархуу Ж. О выборе способов разделения сульфидного медно-молибденового концентрата с использованием высокомолекулярных депрессоров // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2007. — № 8. — С. 235–242.

19. *Miki H., Hirajima T., Muta Y., Suyantara G. P. W., Sasaki K.* Investigation of reagents for selective flotation on chalcopyrite and molybdenite / Proceedings of the XXIX International Mineral Processing Congress, IMPC 2018. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. 2019. pp. 1854–1861. ГИАБ

REFERENCES

1. *Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu Klassifikatsii zapasov mestorozhdeniy i prognoznykh resursov tverdykh poleznykh iskopaemykh. Molibdenovye rudy. Rasporyazhenie MPR Rossii ot 05.06.2007 № 37-r* [Application guideline: Classification of mineral reserves and undiscovered potential resources of solid minerals. Molybdenum ore. RF Ministry of Natural Resources Decree No. 37-r as of 5 June 2007], Moscow, MPR RF, 2007, 37 p. [In Russ].

2. Abramov A. A. Physico-chemical modeling of flotation systems. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 1998, vol. 19, no. 1, pp. 409–459. Published online: 28 Nov 2010.

3. Abramov A. A., Forsberg K. S. E. Chemistry and optimal conditions for copper minerals flotation: Theory and practice. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2005, vol. 26, no. 2, pp. 77–143.

4. Bakalarz A., Gloy G., Luszczkiewicz A. Flotation of sulfide components of copper ore in the presence of n-Dodecane. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2015, vol. 36, no. 2, pp. 103–111. Published Online: 25 Sep 2014.

5. Bukhorov Sh. B., Khaydarov A. A., Khamraev S. S., Khalmatov M. M. Joint application of reagents in flotation of copper–molybdenum ore. *Gornyi Zhurnal*. 2009, no. 1, pp. 49–51. [In Russ].

6. Rudchekanova L. G., Radushev A. V., Baygacheva E. V., Chernova G. V. New collectors for flotation of sulfide ore. *Obogashchenie rud*. 2009, no. 1, pp. 34–36. [In Russ].

7. Abramov A. A. *Tekhnologiya pererabotki i obogashcheniya rud tsvetnykh metallov*. T. 3. Kniga 1 [Processing and concentration technology for nonferrous metal ore, vol. 3, book 1], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2005, 575 p.

8. Gül A. The role of Na2S2O5 and activated carbon on the selective flotation of chalcopyrite from a copper ore using a dithiophosphine-type collector. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2007, vol. 28 no. 3, pp. 235–245. Published Online: 07 May 2007.

9. Zhang Y., Tang Z., Shirokoff J. Study on flotability and surface oxidation of sulfide minerals from the tailing of an iron-copper mine using electron probe microanalyzer. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2019. Published Online: 25 Dec 2019. DOI: 10.1080/ 08827508.2019.1707675.

10. Matveeva T. N., Chanturiya V. A., Getman V. V., Gromova N. K., Ryazantseva M. V., Karkeshkina A. Yu., Lantsova L. B., Minaev V. A. The effect of complexing reagents on flotation of sulfide minerals and cassiterite from tin-sulfide tailings. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2020. Published Online: 21 Dec 2020. DOI: 10.1080/08827508.2020.1858080.

11. Bakalarz A. Chemical and mineral analysis of flotation tailings from stratiform copper ore from lubin concentrator plant (SW Poland). *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2019, vol. 40, no. 6, pp. 437–446. Published Online: 27 Sep 2019.

12. Chanturia V. A., Ivanova T. A., Getman V. V., Koporulina E. V. Methods of minerals modification by the micro- and nanoparticles of gold and platinum for the evaluation of the collectors selectivity at the flotation processing of noble metals from the fine ingrained ores. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2015, vol. 36, no. 5, pp. 288–304.

13. Bobrakova A. A. Rationale reagent equipment regime of sulfide flotation of molybdenum ores alumosilicate composition. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2013, no. 12, pp. 298 — 301. [In Russ].

14. Karnaukhov S. N., Plyasovitsa S. S., Vilkova N. V. Processing technology for molybdenum-bearing ore. *Tsvetnye metally*. 2011, no. 8/9, pp. 55–61. [In Russ].

15. Delger R. *Issledovanie i razrabotka effektivnoy tekhnologii, obespechivayushchey povyshenie izvlecheniya molibdena pri obogashchenii medno-molibdenovykh rud mestorozhdeniya «Erdenetiyn-Ovoo» (Mongoliya), v usloviyakh izmeneniya mineral'nogo sostava* [A new efficient technology for enhanced recovery of molybdenum in processing of Mongolia's Erdenetiin Ovoo Mine copper–molybdenum ore under conditions of varied mineral composition], Candidate's thesis, Moscow, GINTsVETMET, 2012, 23 p.

16. Grujic M., Salatić D., Djurkoyić I., Grujić M. M. Flotability of copper, gold and platinum minerals in function of liberation rate and applied collector. *Journal of Mining and Metallurgy A: Mining*. 2004, vol. 40, no. 1, pp. 33 — 47.

17. Farinato R. S., Nagaraj L. R. Time dependent wettabiliti of mineral and metal surfaces in the presence of thiol surfactants. *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 6, no. 12, pp. 1331–1345.

18. Bocharov V. A., KHachatryan L. S., Ignatkina V. A., Baatarkhuu Zh. Selecting sulfide copper–molybdenum concentrate separation techniques using high-molecular depressants. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2007, no. 8, pp. 235–242. [In Russ].

19. Miki H., Hirajima T., Muta Y., Suyantara G. P. W., Sasaki K. Investigation of reagents for selective flotation on chalcopyrite and molybdenite. *Proceedings of the XXIX International Mineral Processing Congress, IMPC 2018*. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. 2019. pp. 1854–1861.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Матвеева Тамара Николаевна[1] — д-р техн. наук,
заместитель директора по научной работе,
заведующий отделом, e-mail: tmatveyeva@mail.ru,
https://orcid.org/0000-0002-5658-9948,
Чантурия Валентин Алексеевич[1] — д-р техн. наук,
профессор, Академик РАН,
научный руководитель отдела, e-mail: vchan@mail.ru,
https://orcid.org/ 0000-0002-4410-8182,
Гетман Виктория Валерьевна[1] — канд. техн. наук,
старший научный сотрудник, e-mail: viktoriki.v@gmail.com,
https://orcid.org/0000-0003-4322-5739,
Каркешкина Анна Юрьевна[1] — научный сотрудник,
e-mail: ankatrin06@mail.ru,
https://orcid.org/0000-0002-5319-5871,
Громова Надежда Константиновна[1] — научный сотрудник,
e-mail: gromova_nk@mail.ru,
https://orcid.org/0000-0002-4753-5745,
[1] ИПКОН РАН.
Для контактов: Гетман В.В., e-mail: viktoriki.v@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

T.N. Matveeva[1], Dr. Sci. (Eng.), Deputy Director for Scientific Work,
Head of Department, e-mail: tmatveyeva@mail.ru,
https://orcid.org/0000-0002-5658-9948,
V.A. Chanturiya[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Academician of Russian Academy of Sciences,
Scientific Director of Department, e-mail: vchan@mail.ru,
https://orcid.org/ 0000-0002-4410-8182,
V.V. Getman[1], Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
e-mail: viktoriki.v@gmail.com,
https://orcid.org/0000-0003-4322-5739,
A.Yu. Karkeshkina[1], Researcher, e-mail: ankatrin06@mail.ru,
https://orcid.org/0000-0002-5319-5871,
N.K. Gromova[1], Researcher, e-mail: gromova_nk@mail.ru,
https://orcid.org/0000-0002-4753-5745,
[1] Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources
of Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russia.
Corresponding author: N.K. Gromova, e-mail: viktoriki.v@gmail.com.

Получена редакцией 02.09.2021; получена после рецензии 20.09.2021; принята к печати 10.10.2021.
Received by the editors 02.09.2021; received after the review 20.09.2021; accepted for printing 10.10.2021.