

Научная статья
УДК 622.7-9
DOI: 10.21209/2227-9245-2024-30-3-79-88

Исследование реагентного режима флотации одного из золоторудных месторождений Восточного Забайкалья

Татьяна Сергеевна Никанюк¹, Сергей Александрович Конашков²,
Наталья Сергеевна Понхожиева³

^{1,2,3}Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов,
г. Иркутск, Россия

¹tnikanuk@irgiredmet.ru, ²konashkov@irgiredmet.ru, ³pons@irgiredmet.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию
04.03.2024

Одобрена после
рецензирования 08.07.2024

Принята к публикации
06.08.2024

Ключевые слова:
химический состав,
минеральный состав,
флотация, реагентный
режим, содержание,
извлечение, золото,
КЭТГОЛ, КОН-92, жидкое
стекло, сульфидные руды

Актуальность исследования заключается в том, что конечный продукт флотации руды одного из золотосодержащих месторождений Восточного Забайкалья, подлежащий реализации, имеет низкое содержание золота. Объект исследования – технологическая проба процесса флотации хвостов гравитации руды золоторудного месторождения Восточного Забайкалья. Цель исследования – поиск оптимального реагентного режима процесса флотации для улучшения технологических показателей. Задачи исследования: изучение химического, минерального составов руды и исследование возможности применения реагентов на основе спиртов и сложных эфиров С4-С8 «КЭТГОЛ», «КЭТГОЛ улучшенный», «КОН-92» с целью оптимизации реагентного режима флотации. Методология исследования основывается на изучении свойств компонентов реагентов и их влиянии на процесс флотации. Вещественный состав руд изучали методами атомно-эмиссионного спектрального количественного анализа, рентгенофлуоресцентного, фазового атомно-абсорбционного анализов и атомно-эмиссионного анализа с индуктивно связанной плазмой ICP-AES. Массовую долю общего и органического углерода определяли методом инфракрасной абсорбции. Содержание золота в исходной руде приведено по данным пробирной плавки. При проведении опытов по флотации использовали оборудование Иркутского научно-исследовательского института благородных и редких металлов и алмазов. В результате исследований изучен вещественный состав руды и проведены лабораторные исследования флотационного обогащения пробы руды. Сформулирован следующий вывод по вещественному составу: изученная проба руды относится к первичному золото-кварцевому, умеренно-сульфидному минеральному типу руд. Содержание золота – 3,12 г/т, серебра – 6,9 г/т. Золото в руде в основном мелкое и тонкое, а его пробность составляет 708. Результаты по флотационному обогащению показали, что применение реагента «КЭТГОЛ» в качестве дополнительного собирателя к бутиловому ксантогенату калия в соотношении 2:1 при общем расходе 90 г/т является эффективным средством для повышения извлечения золота до ~87–89 %, при этом качество концентрата основной флотации остается на уровне ~15,5–16,5 г/т.

Original article

Research of the Reagent Use in the Flotation of Ore from a Gold Mine in Eastern Transbaikalia

Tatiana S. Nikanyuk¹, Sergey A. Konashkov², Natalia S. Ponkhozheva³

^{1,2,3}Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds, Irkutsk, Russia

¹tnikanuk@irgiredmet.ru, ²konashkov@irgiredmet.ru, ³pons@irgiredmet.ru

Information about the article

Received 4 March 2024

Approved after review
8 July 2024

Accepted for publication
6 August 2024

The relevance of the problem is that the final product of flotation of the Eastern Transbaikalia deposit to be sold, has a low content. The object of the research is as follows: technological sample of the original ore of the gold deposit in Eastern Transbaikalia. The purpose of the research includes the search for the optimal reagent regime during the flotation process to improve technological performance. The research objectives are to study the chemical and mineral composition and to investigate the possibility of using reagents based on alcohols and C4-C8 esters "KETGOL", "KETGOL improved", "KON-92". The research methodology is based on studying

the properties of the components and their influence on the flotation process. The material composition of the ores has been studied by methods of atomic emission spectral quantitative analysis, X-ray fluorescence, phase atomic absorption analyzes and atomic emission analysis with inductively coupled plasma ICP-AES. The mass fraction of total and organic carbon is determined by the infrared absorption method. The gold content in the original ore is based on assay data. When conducting flotation experiments, the equipment of JSC Irgiredmet has been used. As a result of the research, the material composition is studied and laboratory studies of flotation enrichment of the ore sample are carried out. Conclusions on the material composition are as follows: the studied ore sample belongs to the primary gold-quartz, moderate sulfide mineral type of ore. The gold content is 3.12 g/t, silver – 6.9 g/t. The gold in the ore is mostly small and thin, its fineness is 708. The results of flotation enrichment have showed that the use of the KETGOL reagent as an additional collector to potassium butyl xanthate (BX) in a 2:1 ratio with a total consumption of 90 g/t is an effective means of increasing gold recovery to ~87–89 %, with in this case, the quality of the main flotation concentrate remains at the level of ~15.5–16.5 g/t.

Keywords:

chemical composition, mineral composition, flotation, reagent use, content, recovery, gold, CATGOL, CON-92, liquid glass, sulphide ores

Введение. Одной из основных проблем в горно-перерабатывающей и металлургической промышленности является снижение качества сырья при флотационном обогащении золотосодержащих руд. Для определения областей и подбора условий применения флотационных реагентов на одном из золоторудных месторождений Восточного Забайкалья с целью повышения извлечения и качества концентратов использованы реагенты С4-С8 «КЭТГОЛ», «КЭТГОЛ улучшенный», «КОН-92» (производитель – ПАО «СИБУР Холдинг») и жидкое стекло.

Актуальность исследования заключается в том, что конечный продукт флотации (концентрат перераспределения руд) месторождения Восточного Забайкалья, подлежащий реализации, имеет низкое содержание.

Объект исследования – технологическая проба процесса флотации хвостов гравитации руды золоторудного месторождения Восточного Забайкалья.

Предмет исследования – реагентный режим золотосодержащей руды одного из месторождений Восточного Забайкалья.

Цель исследования – поиск оптимального реагентного режима при процессе флотации для улучшения технологических показателей обогащения.

Задачи исследования: изучить химический и минеральный состав золоторудного месторождения, исследовать возможность применения реагентов на основе спиртов и сложных эфиров С4-С8 «КЭТГОЛ», «КЭТГОЛ улучшенный», «КОН-92».

Методология и методы исследования основаны на изучении свойств компонентов реагентов и их влиянии на процесс флотации. Вещественный состав руд изучали методами атомно-эмиссионного спектрального

количественного анализа, рентгенофлуоресцентного, фазового атомно-абсорбционного анализов и атомно-эмиссионного анализа с индуктивно связанной плазмой ICP-AES. Массовую долю общего и органического углерода определяли методом инфракрасной абсорбции.

Исследования выполняли в соответствии с общепринятыми методиками химического, минерального составов и флотационного обогащения.

Содержание золота в исходной руде приведено по данным пробирной плавки, а содержание золота в монофракциях сульфидов и содержание серебра – по данным атомно-абсорбционного анализа. Минералогические исследования осуществляли на стереомикроскопе LivenhukZOOM1B. Минеральный состав пробы руды также оценивали по результатам рентгеноструктурного (дифрактометрического) анализа, выполненного на аппаратах XRD-6000, Shimadzu при Cu-фильтрованном излучении. При проведении опытов по флотации использовали оборудование Иркутского научно-исследовательского института благородных и редких металлов и алмазов.

Разработанность темы исследования. Вещественный состав проб золоторудного месторождения Восточного Забайкалья изучался Т.С. Никанюк в Иркутском научно-исследовательском институте благородных и редких металлов и алмазов с 2007 г. Кроме того, проанализировано и изучено применение флотационных реагентов «КЭТГОЛ», «КЭТГОЛ улучшенный», «КОН-92», которые при обогащении золотосодержащих руд данного месторождения Восточного Забайкалья с целью повышения извлечения и качества концентратов использованы впервые.

При флотации молибденсодержащих и золотосодержащих руд в качестве реагента для флотации применяют кубовый остаток нефтехимии, полученный при производстве бутиловых спиртов, масляных альдегидов, 2-этилгексанола, 2-этилгексановой кислоты, этилена-пропилена и этилбензола.

Наиболее близким по технической сущности и достигаемому результату с ксантогенатами, дитиофосфатами и жирными кислотами при флотации руд является кубовый остаток производства бутиловых спиртов методом оксосинтеза (КОБС).

В состав КОБС входят алифатические спирты – 50 %, сложные эфиры – 20 %, ацетали – 19 %, альдегиды – 10 %, углеводороды – 1 %.

Повышение технологических показателей обогащения руд достигается применением реагента для флотации руд, включающего кубовые остатки производства бутиловых спиртов методом оксосинтеза и дополнительно содержащего кубовые остатки производства масляных альдегидов, 2-этилгексанола, 2-этилгексановой кислоты, этилена-пропилена и этилбензола («КОН-2»).

Повышение технологических показателей при использовании заявляемого реагента объясняется благоприятным химическим составом и соотношением присутствующих в нём компонентов: насыщенных и ненасыщенных тяжёлых углеводородов алифатического и ароматического строения, высших альдегидов, спиртов, жирных кислот, простых и сложных эфиров.

Во всех изученных процессах большая длина углеводородных радикалов компонентов смеси является причиной высоких сорбительных свойств «КОН-92», а наличие полярных сорбционно-активных группировок обеспечивает необходимую для флотации прочность закрепления молекул реагента на минералах. При этом заявляемый реагент может использоваться как самостоятельный (при флотации молибденовых руд) и как дополнительный собиратель (при флотации золотосодержащих руд).

Вещественный состав руд данного золоторудного месторождения анализировали и изучали неоднократно [1–4; 9; 10; 12]. Выявлено, что руда относится к классу упорных руд [1; 14]. Для более глубокого исследования в области оптимизации реагентного режима процесса флотации золотосодержащей руды проанализированы работы других авторов [13; 14–16; 17].

Основные результаты исследования и их обсуждение.

1. Вещественный состав пробы руды.

Поступившая на исследования проба руды отобрана непосредственно с конвейерной ленты, поступающей на обогащательную фабрику.

Химический состав пробы руды представлен в табл. 1, из данных которой видно, что проба более чем на 94 % состоит из литофильных компонентов с преобладанием диоксида кремния (61,0 %). Доля оксида алюминия равна 12,1 %. Сумма оксидов щелочей (K_2O+Na_2O) составляет 4,49 % с преобладанием оксида калия (2,91 %). Массовая доля оксидов кальция равна 4,02 %, магния – 2,64 %.

Таблица 1 / Table 1

Химический состав пробы руды / Chemical composition of the ore sample

Компоненты / Components	Массовая доля, % / Mass fraction, %	Компоненты / Components	Массовая доля, % / Mass fraction, %
SiO ₂	61,0	Cu	0,031
Al ₂ O ₃	12,1	Zn	0,043
TiO ₂	0,53	Sb	0,040
CaO	4,02	B	0,0006
Na ₂ O	1,58	Ba	0,072
K ₂ O	2,91	Bi	0,003
MnO	0,06	Be	0,0003
MgO	2,64	Co	0,0026
P ₂ O ₅	0,35	Cr	0,024
Fe _{общ.} / Fe _{total}	6,50	La	0,0043
Fe _{окисл.} / Fe _{oxidized}	2,10	Ni	0,0046
Fe _{сульф.} / Fe _{sulphide}	4,40	Sr	0,054
S _{общ.} / S _{total}	3,88	V	0,0073
S _{окисл.} / S _{oxidized}	<0,05	Y	0,0012
S _{сульфид} / S _{sulphide}	3,85	Zr	0,0047
As _{общ.} / As _{total}	1,50	C _{общ.} / C _{total}	0,6
As _{окисл.} / As _{oxidized}	0,03	C _{опр.} / C _{organic}	<0,1
As _{сульфид} / As _{sulphide}	1,47	Ag, г/т / Ag, g/t	6,9
Pb	0,12	Au, г/т / Au, g/t	3,12

Рудообразующие компоненты представлены, главным образом, железом, серой и мышьяком. Общая масса железа в пробе составляет 6,5 %. Количество сульфидного железа находится на уровне 4,4 %, оксидного – 2,1 %. Доля общей серы составляет 3,88 %, общего мышьяка – 1,50 %, которые практически полностью присутствуют в

сульфидной форме. На долю свинца приходится 0,12 %. Массовые доли меди, цинка и сурьмы не превышают сотых долей процента. Степень окисления руды, рассчитанная по железу, составляет 1 %. Исходя из этого, проба руды относится к первичному типу руд¹.

Качественный минеральный состав пробы руды, по данным рентгеноструктурного фазового (дифрактометрического) анализа, представлен (по мере убывания) кварцем, биотитом, калиевым полевым шпатом, плагиоклазами, пироксенами, пиритом, арсенопиритом, карбонатами, амфиболами и каолинитом.

Количественный минералогический анализ выполнен по методике Иркутского научно-исследовательского института благородных и редких металлов и алмазов. Минеральный состав пробы приведён с учетом данных рентгеноструктурного и химического анализов (табл. 2).

Как следует из табл. 2, проба руды на 88,9 % состоит из породообразующих минералов с преобладанием кварца (25,9 %), слюды (24,0 %), калиевого полевого шпата (15,0 %), плагиоклазов (11,0 %), которые по данным рентгеноструктурного анализа представлены олигоклазом и андезином. Пироксены составляют 5,0

%, карбонаты – 4,0 %, амфиболы – 2,0 %. Массовая доля глинистых образований и хлорита находится в пределах 2,0 %.

Рудные минералы в пробе представлены сульфидами (9,3 %), основными из которых являются пирит (5,9 %) и арсенопирит (3,2 %). В количестве по 0,1 % присутствуют галенит и халькопирит. В редких и единичных зёрнах отмечаются сфалерит и антимонит. По содержанию сульфидов проба относится к умеренно сульфидному типу руд.

Пирит является основным сульфидным минералом исследуемой пробы. В дроблёной руде крупностью минус 2,0 мм он наблюдается в основном в виде кубовидных кристаллов, их обломков, тонкозернистых агрегатов. Размер зёрен составляет 2,0–0,05 мм с преобладанием в интервале 2,0–0,16 мм.

Арсенопирит присутствует в основном в виде призматических, ромбовидных и неправильной формы зёрен размером основной массы 2,0–0,16 мм.

Галенит отмечается в виде кубовидных кристаллов, их обломков. Размер зёрен – до 0,1 мм.

Халькопирит зафиксирован в виде зёрен неправильной формы размером до 0,1 мм.

Сфалерит и *антимонит* встречаются в виде редких и единичных зёрен.

Таблица 2 / Table 2

Минеральный состав пробы руды / Mineral composition of the ore sample

<i>Минералы, их группы / Minerals, groups of minerals</i>	<i>Массовая доля, % / Mass fraction, %</i>
Кварц / Quartz	25,9
Слюды (биотит, мусковит, серицит) / Micas (biotite, muscovite, sericite)	24,0
Калиевый полевой шпат (ортоклаз) / Potassiumfeldspar (orthoclase)	15,0
Плагиоклазы (олигоклаз, андезин) / Plagioclases (oligoclase, andesine)	11,0
Пироксены (диопсид, гиперстен) / Pyroxenes (diopside, hypersthene)	5,0
Карбонаты (кальцит, анкерит, доломит) / Carbonates (calcite, ankerite, dolomite)	4,0
Амфиболы (роговая обманка, актинолит) / Amphiboles (hornblende, actinolite)	2,0
Каолинит, хлорит, монтмориллонит / Kaolinite, chlorite, montmorillonite	2,0
Сульфиды, в том числе: / Sulphides incl.:	9,3
Пирит / Pyrite	5,9
Арсенопирит / Arsenopyrite	3,2
Галенит / Galena	0,1
Халькопирит / Chalcopyrite	0,1
Сфалерит, антимонит / Sphalerite, antimonite	Редкие зёрна / Single grains
Оксиды титана (рутил, лейкоксен) / Titaniumoxides (rutile, leucosene)	0,5
Апатит / Apatite	0,8
Акцессорные: оливин / Accessory minerals: olivine	0,5
Итого: / Total:	100,0

¹ Лодейщиков В. В., Васильева А. В. Методические рекомендации по типизации руд, технологическому опробованию и картированию коренных месторождений золота. – Иркутск: Иргиредмет, 1997.

Глинистая фракция (~ 1,0 %) по данным рентгеноструктурного анализа представлена на 66 % слюдой (биотит) и глинистыми минералами в виде каолинита (19 %) и монтмориллонита (15 %).

Характеристика золота приводится на основании его изучения в гравиоцентрированных. Установлено, что цвет золотин в основном соломенно-жёлтый. Поверхность основной массы частиц золота неровная, мелкобугорчатая, шероховатая. Форма золотин в основном неправильная с неровными краями и короткими отростками, компактная, уплощённая, таблитчатая, удлиненная, комковатая, чешуйчатая. Некоторое количество золотин раскрывается частично и присутствует в виде сростков с кварцем и сульфидами. Частицы золота по цвету и характеру поверхности схожи во всех классах крупности.

Пробность золота по данным атомно-абсорбционного анализа составляет 708. Таким образом, золото в пробе руды относится к относительно низкопробному (интервал пробности – 700–799).

Гранулометрию золота изучали на материале продуктов гравитации. Гранулометрическая характеристика золота приведена в табл. 3.

Таблица 3 / Table 3

Гранулометрическая характеристика золота /
Gold particle size

Классы крупности, мм / Size, mm	Массовая доля, % / Mass fraction, %
Минус 1,0 + 0,5 / Minus 1,0 + 0,5	Не обнаружено/ not detected
Минус 0,5 + 0,25 / Minus 0,5 + 0,25	1,3
Минус 0,25 + 0,16 / Minus 0,25 + 0,16	1,5
Минус 0,16 + 0,1 / Minus 0,16 + 0,1	12,6
Минус 0,1 + 0,071 / Minus 0,1 + 0,071	4,3
Минус 0,071 + 0,05 / Minus 0,071 + 0,05	5,6
Минус 0,05 / Minus 0,05	74,7
Итого: / Total:	100,0

Как видно из табл. 3, преобладают мелкие, тонкие и тонкодисперсные частицы золота (класс крупности минус 0,071 мм) – 80,3 %. Доля крупного золота (класс крупности +0,071 мм) составляет 19,7 %. Наибольшая массовая доля золота зафиксирована (12,6 %) в классе крупности минус 0,16+0,10 мм. На класс крупности минус 0,071 +0,05 мм приходится 5,6 %.

Для определения содержания золота в сульфидах проводили выборку монофракций минералов под биноклем, в классах крупности минус 2,0 +0,10 мм. По результатам атомно-абсорбционного анализа содержание золота в монофракции пирита составляет 16,6 г/т, арсенопирита – 13,2 г/т.

2. *Лабораторные исследования флотационного обогащения пробы руды.* Для проведения тестовых опытов предоставлены реагенты «КЭТГОЛ», «КЭТГОЛ улучшенный», «КОН-92» и жидкое стекло.

Реагент «КЭТГОЛ» представляет собой жидкость от тёмно-зелёного до тёмно-коричневого цвета с резким запахом органических растворителей. Он применяется в угольной промышленности для флотации угольных шламов, руд, а также для других целей. Реагент «КОН-92», кубовый остаток нефтехимии, – это однородная малолетучая жидкость от светло-коричневого до тёмно-коричневого цвета с резко выраженным запахом, содержащая высококипящие компоненты. В сравнении с известными собирателями при помощи кубового остатка нефтехимии достигаются более высокие технологические показатели флотации, высокая селективность, доступность на рынке, низкая токсичность и невысокая стоимость продукта. Имея в составе спирты, реагенты «КОБС» и «КЭТГОЛ» используются в качестве гетерополярных пенообразователей при флотации углей.

Для проведения исследований по флотационному обогащению руды золоторудного месторождения Восточного Забайкалья применена упрощённая схема основной флотации в условиях открытого цикла [5–8; 11; 13]. Питанием флотации являлись хвосты гравитации с содержанием золота 1,55 г/т. Проведён нулевой опыт по режиму, заложенному в ТР фабрики: собиратель – бутиловый ксантогенат калия (БКК) с расходом 60 г/т, вспениватель оксаль (Т-92) – 60 г/т. Плотность питания флотации составила 30 % твёрдого, рН~8,0–8,5 (схема проведения опытов по флотации приведена на рисунке, реагентный режим – в табл. 4). Для применения новых реагентов разработаны режимы флотации с применением реагентов «КЭТГОЛ», «КЭТГОЛ улучшенный» и «КОН-92», обладающие вспенивающими свойствами. Вспениватель Т-92 в опыты 1–7 не подавался. Результаты нулевого опыта и результаты тестовых опытов с применением новых реагентов-собирателей представлены в табл. 5.

Реагентный режим опытов, выполненных на пробе руды /
Reagent use in the flotation experiments on the ore sample

№ опыта / Experiment No.	Операция / Stage	Расход реагентов на 1 т руды					
		жидкое стекло/ Liquid glass	КЭТГОЛ / CATGOL	КЭТГОЛ Ул. / CATGOL modified	БКК / PBX	Т-92 / T-92	КОН-92 / CON-92
Нулевой / Zero	Основная / Basic	-	-	-	60	60	-
1	Основная / Basic	-	115	-	-	-	-
2	Основная / Basic	-	60	-	30	-	-
3	Основная / Basic	-	-	-	-	-	115
4	Основная / Basic	-	-	200	-	-	-
5	Основная / Basic	-	60	-	30	-	-
	Перечистка / Re-Cleaning	200	-	-	-	-	-
6	Основная / Basic	-	200	-	-	-	-
	Перечистка / Re-Cleaning	200	-	-	-	-	-
7	Основная / Basic	-	-	100	30	-	-
	Перечистка / Re-Cleaning	200	-	25	-	-	-



Схема флотационных опытов, выполненных на пробе руды /
Flowsheet of the flotation experiments on the ore sample

Таблица 5 / Table 5

Результаты флотационных опытов на пробе руды / Results of the flotation experiments on the ore sample

Наименование продуктов / Product	Выход, % / Yield, %	Содержание Au, г/т / Au content, g/t	Извлечение Au, % / Au recovery, %	Содержание Ag, г/т / Ag content, g/t	Извлечение Ag, % / Ag recovery, %
Нулевой опыт / Zero experiment					
Концентрат / Concentrate	7,6	16,80	83,7	55,40	80,1
Хвосты / Tailings	92,4	0,27	16,3	1,14	19,9
Итого: исходная руда / Total: feed ore	100,0	1,53	100,0	5,28	100,0
Опыт 1 / Experiment 1					
Концентрат / Concentrate	4,3	21,90	59,8	77,10	62,7
Хвосты / Tailings	95,7	0,66	40,2	2,05	37,3
Итого: исходная руда / Total: feed ore	100,0	1,57	100,0	5,27	100,0
Опыт 2 / Experiment 2					
Концентрат / Concentrate	8,6	16,20	87,4	56,40	84,1
Хвосты / Tailings	91,4	0,22	12,6	1,00	15,9

Окончание табл. 5

Наименование продуктов / Product	Выход, % / Yield, %	Содержание Au, г/т / Au content, g/t	Извлечение Au, % / Au recovery, %	Содержание Ag, г/т / Ag content, g/t	Извлечение Ag, % / Ag recovery, %
Итого: исходная руда / Total: feed ore	100,0	1,59	100,0	5,76	100,0
Опыт 3 / Experiment 3					
Концентрат / Concentrate	3,2	22,30	47,3	82,00	48,9
Хвосты / Tailings	96,8	0,83	52,7	2,86	51,1
Итого: исходная руда / Total: feed ore	100,0	1,52	100,0	5,41	100,0
Опыт 4 / Experiment 4					
Концентрат / Concentrate	11,3	11,00	79,2	41,30	82,1
Хвосты / Tailings	88,7	0,37	20,8	1,15	17,9
Итого: исходная руда / Total: feed ore	100,0	1,58	100,0	5,70	100,0
Опыт 5 / Experiment 5					
Концентрат, в том числе: / Concentrate, incl.:	9,1	15,57	88,6	51,24	83,4
Концентрат перерешетки / Re-Cleaning concentrate	6,1	18,50	70,6	64,69	70,6
Промпродукт перерешетки / Re-Cleaning middlings	3,0	9,60	18,0	23,90	12,8
Хвосты / Tailings	90,9	0,20	11,4	1,02	16,6
Итого: исходная руда / Total: feed ore	100,0	1,60	100,0	5,59	100,0
Опыт 6 / Experiment 6					
Концентрат, в том числе: / Concentrate, incl.:	7,4	14,78	68,6	46,76	64,6
Концентрат перерешетки / Re-Cleaning concentrate	1,5	40,90	39,1	153,00	43,5
Промпродукт перерешетки / Re-Cleaning middlings	5,9	8,00	29,5	19,20	21,1
Хвосты / Tailings	92,6	0,54	31,4	2,04	35,4
Итого: исходная руда / Total: feed ore	100,0	1,59	100,0	5,34	100,0
Опыт 7 / Experiment 7					
Концентрат, в том числе: / Concentrate, incl.:	7,7	14,62	75,9	46,67	70,4
Концентрат перерешетки / Re-Cleaning concentrate	3,3	20,90	46,5	69,00	44,6
Промпродукт перерешетки / Re-Cleaning middlings	4,4	9,90	29,3	29,90	25,7
Хвосты / Tailings	92,3	0,39	24,1	1,65	29,6
Итого: исходная руда / Total: feed ore	100,0	1,49	100,0	5,13	100,0

В нулевом опыте извлечение золота в концентрат основной флотации составило 83,7%, а содержание Au в нём – 16,80 г/т, выход – 7,6 %.

В результате замены БКК на «КЭТГОЛ» (опыт 1) выход концентрата сократился до 4,3 % с соответствующим снижением извлечения золота до 59,8 %.

При сочетании реагента «КЭТГОЛ» и БКК в соотношении 2:1 (опыт 2, опыт 5) увеличивается выход основного концентрата с 7,6 % (нулевой опыт) до 8,6% (опыт 2) до 9,1 % (опыт 5). Извлечение золота в основной концентрат увеличилось с 83,7% (нулевой опыт) до 87,7 % (опыт 2) и 88,6 % (опыт 5). За счёт увеличения выхода получен прирост извлечения Au в концентрат основной флотации в опытах 2 и 5 на 4 и 6,6 % соответственно.

При применении реагента «КОН-92» (опыт 3, расход 115 г/т) извлечение концентрата основной флотации снизилось в 2 раза в сравнении с нулевым опытом и составило 3,2 %, а извлечение золота упало до 47,3 %.

В результате замены БКК на «КЭТГОЛ улучшенный» в опыте 4 даже при увеличении его расхода до 200 г/т извлечение золота также получено ниже уровня нулевого опыта – 79,2 против 83,7 %.

Опыт 6 выполнен для сравнения эффективности действия флотационных реагентов «КЭТГОЛ» с «КЭТГОЛ улучшенный» (опыт 4). Выход концентрата флотации при использовании реагента «КЭТГОЛ» сократился с 11,3 % (с «КЭТГОЛ улучшенный») до 7,4 % с соответствующим снижением извлечения золота с 79,2 до 68,6 %.

Опыт 7 с использованием совместной подачи «КЭТГОЛ улучшенный» и БКК в соотношении 3:1 при общем расходе 120 г/т показал снижение уровня извлечения золота по сравнению с нулевым опытом.

Опыты 5–7 проведены с перечисткой основного концентрата с целью повышения качества конечного концентрата. Продолжительность перечистки составила 2 мин. В перечистку подавали жидкое стекло по аналогии с ранее выполненными исследованиями на этом типе руды. Подача жидкого стекла с расходом 200 г/т рекомендована ранее.

В опытах 5 и 7 перечистка основного концентрата прошла малоэффективно. Содержание золота повысилось с 15,57 до 18,50 г/т и с 14,62 до 20,90 г/т соответственно. В опыте 6 подача жидкого стекла в перечистку способствовала сокращению выхода концентрата с 7,4 до 1,5 % с повышением качества концентрата с 14,78 до 40,90 г/т. Однако извлечение золота в конечный продукт составило 39,1 %, потери с промпродуктом перечистки – 29,5 %.

Анализируя результаты по извлечению серебра, можно констатировать, что с повышением извлечения золота в концентрат основной флотации повышается извлечение серебра.

Выводы. По результатам исследований изученная проба руды относится к золото-кварцевому, умеренно сульфидному минеральному типу руд. По степени окисления железа (1 %) руда относится к первичному типу руд. Проба преимущественно состоит из литофильных элементов, с преобладанием оксида кремния (61,0 %). Рудообразующие компоненты представлены, главным образом, железом, серой и мышьяком. Общая

масса железа в пробе составляет 6,5 %, общей серы – 3,88 %, общего мышьяка – 1,50 %, которые в большей степени присутствуют в сульфидной форме. Главными породообразующими минералами пробы являются полевые шпаты, кварц и слюды. Суммарная доля сульфидов составляет 9,3 %. Ведущие сульфиды – пирит (5,6 %) и арсенопирит (3,2 %). Содержание золота в руде составляет 3,12 г/т. Золото в основном (80,3 %) мелкое и тонкое (класс крупности минус 0,071 мм). Его пробность находится на уровне 708‰ и относится к относительно низкопробному классу.

Проведённые исследования по применению реагентов «КЭТГОЛ», «КОН-92» и «КЭТГОЛ улучшенный» позволяют сделать следующие выводы:

1) замена БКК на реагенты «КЭТГОЛ», «КОН-92» и «КЭТГОЛ улучшенный» не показала повышение извлечения золота в основной концентрат;

2) использование реагента «КЭТГОЛ» в качестве дополнительного собирателя к БКК в соотношении 2:1 при общем расходе 90 г/т является эффективным для повышения извлечения золота до ~88 %, при этом качество концентрата основной флотации остаётся на уровне ~15,5–16,5 г/т.

Соответственно, исследуемый реагентный режим процесса флотации золотосодержащей руды одного из месторождений Восточного Забайкалья с применением реагента «КЭТГОЛ» как самостоятельного собирателя, так и в качестве дополнительного БКК не показал значительного улучшения извлечения золота в концентрат основной флотации. Соответственно, следует продолжить исследования

Список литературы

1. Абрамов Б. Н. Новые данные о формировании Верхне-Алиинского золоторудного и Нойон-Тологойского полиметаллического месторождений (Восточное Забайкалье) // Геосферные исследования. 2018. № 3. С. 34–42.
2. Бородина Н. А. Усовершенствование методики химической подготовки минерального сырья с низким содержанием золота // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2022. № 10-1. С. 118–121.
3. Гвоздев В. И., Гребенникова А. А., Вах А. С., Горячев Н. А., Федосеев Д. Г. Эволюция процессов минералообразования при формировании золото-редкометалльных руд Средне-Голготайского месторождения (Восточное Забайкалье) // Тихоокеанская геология. 2020. Т. 39, № 1. С. 70–91.
4. Горячев Н. А., Никанюк Т. С., Будяк А. Е. О рудной минерализации Верхне-Алиинского месторождения (Забайкальский край, Россия) // Современные направления развития геохимии: материалы Всерос. конф. (с участием зарубежных ученых), посвящ. 65-летию Института геохимии им. А. П. Виноградова и 105-летию со дня рождения академика Л. В. Таусона. Иркутск, 2022. С. 147–148.
5. Евдокимов С. И., Герасименко Т. Е. Разработка режима флотации золотосодержащих руд смесью воздуха с водяным паром // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2021. № 2. С. 162–167.
6. Евдокимов С. И., Герасименко Т. Е., Кодратьев Ю. И. Поверхностные силы структурного происхождения в процессах флотации микродисперсного золота // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 2. С. 17–35.

7. Коннова Н. И., Гольсман Д. А., Бакшеева И. И., Тарасов А. В. Изучение вещественного состава и перспективность флотационного обогащения руды Раисинского месторождения // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2023. № 6.
8. Коннова Н. И., Чебокчинов И. П. Исследование процесса обогащения пробы руды Буреломного рудопроявления методом флотации // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2023. № 12.
9. Никанюк Т. С. Исследования вещественного состава на примере упорных золотосодержащих руд Верхне-Алиинского месторождения // *Золотодобыча*. 2023. № 7. С. 37–42.
10. Никанюк Т. С. Состав руд и характеристика самородного золотаодного из рудопроявлений Восточного Забайкалья // *Наука о Земле и недропользование*. 2023. Т. 46, № 1. С. 36–50.
11. Федотов П. К., Бурдонов А. Е., Новиков Ю. В., Терентьев Н. В., Богданюк И. О. Исследование переработки руд золоторудного месторождения флотационными методами. *Науки о Земле и недропользование*. 2022. Т. 45, № 2. С. 162–171.
12. Федотов П. К., Сенченко А. Е., Федотов К. В., Бурдонов А. Е. Исследование обогатимости полиметаллической руды месторождения Забайкальского края // *Обогащение руд*. 2019. № 3. С. 106–110.
13. Шумилова Л. В., Хатькова А. Н., Размахнин К. К., Простакишин М. Ф. Исследование экологически щадящих методов повышения извлечения золота из упорного минерального сырья // *Вестник Забайкальского государственного университета*. 2023. Т. 29, № 3. С. 74–90.
14. Юргенсон Г. А. Особенности химического состава пирита надрудной зоны Тасеевского золото-серебряного месторождения (Россия, Забайкалье) // *Вестник Забайкальского государственного университета*. 2021. Т. 27, № 5. С. 44–52.
15. Biagioni C., George L. L., Cook N. J., Makovicky E., Moelo Y., Pasero M., Sejkora J., Stanley C. J., Mark W.D. H., Bosi F. The tetrahedrite group: nomenclature and classification // *Am. Mineral*. 2020. Vol. 105, no. 1. P. 109–122.
16. Dong Y., Sun Y., Liu J., Shi X., Li H., Zhang J., Li S., Yi Y., Mo S., Fan L., Jiang L. *Advanced Science*. 2022.
17. Trul A. A., Chekusova V. P., Anisimov D. S., Borshchev O. V., Polinskaya M. S., Agina E. V., Ponomarenko S. A. *Advanced Electronic Materials*. 2022.

References

1. Abramov B. N. New data on the formation of the Verkhne-Aliinsky gold ore and Noyon-Tologoy polymetallic deposits (Eastern Transbaikalia). *Geospheric Studies*, no. 3, pp. 34–42, 2018. (In Rus.)
2. Borodina N. A. Improvement of the technique of chemical preparation of mineral raw materials with a low gold content. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*, no. 10-1, pp. 118–121, 2022. (In Rus.)
3. Gvozdev V. I., Grebennikova A. A., Vakh A. S., Goryachev N. A., Fedoseev D. G. Evolution of mineral formation processes in the formation of gold-rare metal ores of the Sredne-Golgotai deposit (Eastern Transbaikalia). *Pacific Geology*, vol. 39, no. 1, pp. 70–91, 2020. (In Rus.)
4. Goryachev N. A., Nikanyuk T. S., Budyak A. E. On ore mineralization of the Verkhne-Aliinsky deposit (Zabaikalsky Krai, Russia). Modern directions of geochemistry development: materials of the All-Russian Conference (with the participation of foreign scientists), dedicated. The 65th anniversary of the Vinogradov Institute of Geochemistry and the 105th anniversary of the birth of Academician L. V. Towson. Irkutsk, 2022. P. 147–148. (In Rus.)
5. Evdokimov S. I., Gerasimenko T. E. Development of the flotation regime of gold-bearing ores with a mixture of air with water vapor. *Physico-Technical Problems of Mining*, no. 2, pp. 162–167, 2021. (In Rus.)
6. Evdokimov S. I., Gerasimenko T. E., Kondratiev Yu. I. Surface forces of structural origin in the flotation processes of microdispersed gold. *Mining Information and Analytical Bulletin*, no. 2, pp. 17–35, 2020. (In Rus.)
7. Konnova N. I., Golsman D. A., Baksheeva I. I., Tarasov A. V. Study of the material composition and prospects of flotation enrichment of the ore of the Raisinsky deposit. *International Scientific Research Journal*, no. 6, 2023. (In Rus.)
8. Konnova N. I., Chebokchinov I. P. Investigation of the ore sample enrichment process of the windfall ore occurrence by flotation. *International Scientific Research Journal*, no. 12, 2023. (In Rus.)
9. Nikanyuk T. S. Studies of the material composition on the example of persistent gold-bearing ores of the Verkhne-Aliinsky deposit. *Gold Mining*, no. 7, pp. 37–42, 2023. (In Rus.)
10. Nikanyuk T. S. Ore composition and characteristics of native gold ore from ore occurrences of Eastern Transbaikalia. *Earth Science and Subsoil Use*, vol. 46, no. 1, pp. 36–50, 2023. (In Rus.)
11. Fedotov P. K., Burdonov A. E., Novikov Yu. V., Terentyev N. V., Bogdanyuk I. O. Investigation of ore processing of a gold deposit by flotation methods. *Earth Sciences and Subsoil Use*, vol. 45, no. 2, pp. 162–171, 2022. (In Rus.)
12. Fedotov P. K., Senchenko A. E., Fedotov K. V., Burdonov A. E. Study of the enrichment of polymetallic ore deposits of the Trans-Baikal Territory. *Ore Enrichment*, no. 3, pp. 106–110, 2019. (In Rus.)
13. Shumilova L. V., Khatkova A. N., Razmakhnin K. K., Prostakishin M. F. Investigation of environmentally friendly methods for increasing gold extraction from stubborn mineral raw materials. *Transbaikalian State University Journal*, vol. 29, no. 3, pp. 74–90, 2023. (In Rus.)

14. Jurgenson G. A. Features of the chemical composition of pyrite in the supra-ore zone of the Taseevsky gold and silver deposit (Russia, Transbaikalia). *Transbaikal State University Journal*, vol. 27, no. 5, pp. 44–52, 2021. (In Rus.)
15. Biagioni C., George L. L., Cook N. J., Makovicky E., Moelo Y., Pasero M., Sejkora J., Stanley C. J., Mark W.D. H., Bosi F. The tetrahedrite group: Nomenclature and classification // *American Mineralogist*, vol. 105, no. 1, pp. 109–122, 2020. (In Eng.)
16. Dong Y., Sun Y., Liu J., Shi X., Li H., Zhang J., Li S., Yi Y., Mo S., Fan L., Jiang L. *Advanced Science*. 2022. (In Eng.)
17. Trul A. A., Chekusova V. P., Anisimov D. S., Borshchev O. V., Polinskaya M. S., Agina E. V., Ponomarenko S. A. *Advanced Electronic Materials*. 2022. (In Eng.)

Информация об авторах

Никанюк Татьяна Сергеевна, научный сотрудник, Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов, г. Иркутск, Россия; tnikanuk@irgiredmet.ru. Область научных интересов: исследования, вещественный состав.

Конашков Сергей Александрович, заведующий лабораторией обогащения руд, Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов, г. Иркутск, Россия; konashkov@irgiredmet.ru. Область научных интересов: исследования, обогащение, разработка технологий.

Понхожиева Наталья Сергеевна, техник I категории, Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов, г. Иркутск, Россия; PoNS@irgiredmet.ru. Область научных интересов: исследования, обогащение, разработка технологий.

Information about the authors

Nikanyuk Tatiana S., researcher, Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds, Irkutsk, Russia; tnikanuk@irgiredmet.ru. Research interests: researches, material composition.

Konashkov Sergey A., head of ore processing laboratory, Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds, Irkutsk, Russia; konashkov@irgiredmet.ru. Research interests: researches, enrichment, technology development.

Ponkhozhiyeva Natalia S., technician I category, Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds, Irkutsk, Russia; PoNS@irgiredmet.ru. Research interests: researches, enrichment, technology development.

Вклад авторов в статью

Никанюк Т. С. – разработка концепции статьи, проведение минералогических исследований, гранулометрическая характеристика, обработка результатов и расчётов, обзор литературы.

Конашков С. А. – разработка концепции статьи, экспериментальные и теоретические исследования, обработка результатов и расчётов, обзор литературы.

Понхожиева Н. С. – разработка концепции статьи, экспериментальные и теоретические исследования, обработка результатов и расчётов, обзор литературы, построение таблиц и графиков, оформление работы.

The authors' contribution to the article

Nikanyuk T. S. – development of the article concept, conducting mineralogical studies, granulometric characteristics, processing of results and calculations, literature review.

Konashkov S. A. – development of the article concept, experimental and theoretical studies, processing of results and calculations, literature review.

Ponkhozhiyeva N. S. – development of the article concept, experimental and theoretical research, processing of results and calculations, literature review, construction of tables and graphs, design of the work.

Для цитирования

Никанюк Т. С., Конашков С. А., Понхожиева Н. С. Исследование реагентного режима флотации одного из золоторудных месторождений Восточного Забайкалья // *Вестник Забайкальского государственного университета*. 2024. Т. 30, № 3. С. 79–88. DOI: 10.21209/2227-9245-2024-30-3-79-88.

For citation

Nikanyuk T. S., Konashkov S. A., Ponkhozhiyeva N. S. Research of the Reagent use in the Flotation of Ore from a Gold mine in Eastern Transbaikalia // *Transbaikal State University Journal*. 2024. Vol. 30, no. 3. P. 79–88. DOI: 10.21209/2227-9245-2024-30-3-79-88.