

Научная статья
УДК 622.765.061
DOI: 10.21209/2227-9245-2024-30-3-89-100

Оптимизация технологии обогащения бедной технологически упорной золото-углеродсодержащей руды

Екатерина Ивановна Топычканова¹, Наталия Аркадьевна Дементьева²,
Владимир Михайлович Мулло³, Андрей Юрьевич Чикин⁴

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

⁴Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

¹topychkanovaE@irgiredmet.ru, ²dema@irgiredmet.ru, ³Mullov@irgiredmet.ru, ⁴anchik53@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию
04.03.2024

Одобрена после
рецензирования 13.07.2024

Принята к публикации
06.08.2024

Ключевые слова:

упорные руды, органический
углерод, золото,
содержание, извлечение,
сорбционная активность,
флотоконцентрат,
реагент, депрессор,
флотация,
гравифлотоперечистка,
гидрометаллургия

Вовлечение в переработку упорных золотосодержащих руд влечёт за собой проблемы, связанные со сложностью их переработки. К категории упорных относятся руды, переработка которых осложнена тонкой вкрапленностью золота в сульфидные минералы, а также присутствием сорбционно активного углеродистого вещества. Объект исследования – процесс флотационного обогащения бедной дважды упорной золотосодержащей руды с применением новых реагентов-депрессоров углерода (далее – РДУ), а также технология гравифлотоперечистки концентрата основной флотации с последующим автоклавным окислением (далее – АО) концентратов и сорбционным цианированием кеков. Цель исследования – оптимизация технологии обогащения бедной по содержанию золота руды (0,6 г/т), технологически упорной к процессу цианирования, с получением высоких технологических показателей. Задачи исследования: снижение массовой доли органического углерода на стадии обогащения (ниже 0,6 %) в концентратах, поступающих на гидрометаллургическую переработку, проведение тестовых опытов по гидрометаллургической переработке полученного флотоконцентрата по таким двум вариантам схем, как АО исходного флотоконцентрата с последующим сорбционным цианированием кека, предварительная гравифлотоперечистка исходного флотоконцентрата с последующим АО концентрата перечистки и его сорбционным цианированием. Методология исследования основывается на изучении влияния РДУ на флотационные свойства органического углерода в процессе флотации. При проведении флотационных опытов использовано оборудование Иркутского научно-исследовательского института благородных и редких металлов и алмазов, установленное на участке полупромышленных испытаний (лабораторные мельницы, флотационные машины механического типа и вспомогательное оборудование). Исследования выполняли в соответствии с общепринятыми методиками рудоподготовки и флотационного обогащения. В результате достигнуто сокращение массовой доли органического углерода в концентрате флотации с 2 до 0,5 % за счёт применения новых РДУ. Использование новых РДУ при флотации упорных золото-углеродсодержащих руд позволило получить флотоконцентраты, пригодные для их дальнейшей металлургической переработки. Опыты по АО полученного флотоконцентрата основной флотации и последующему сорбционному цианированию кека АО показали, что извлечение золота из него составило 83,5 %. Применение предварительной гравифлотоперечистки флотоконцентрата перед АО позволило повысить извлечение золота до 96,6%.

Optimization of Low-Grade Refractory Gold Ore Processing

*Ekaterina I. Topychkanova*¹, *Natalia A. Dementieva*²,
*Vladimir M. Mullov*³, *Andrey Yu. Chikin*⁴

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

³Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

¹topychkanovaE@irgiredmet.ru, ²dema@irgiredmet.ru, ³Mullov@irgiredmet.ru, ⁴anchik53@mail.ru

Information about the article

Received 4 March 2024

Approved after review
13 July 2024

Accepted for publication
6 August 2024

Keywords:

refractory ores, organic carbon, gold, content, recovery, preg-robbing, flotation concentrate, reagent, depressor, flotation, gravity – cleaner flotation, hydrometallurgy

The processing of refractory gold ores is a challenging task. Refractory ores include ores that cannot be easily processed due to the fine dissemination of gold in sulphide minerals and the presence of preg-robbing carbonaceous matter. Two processes have been studied: flotation of low-grade double refractory gold ore using new carbon depression reagents; gravity – cleaner flotation of rougher flotation concentrate followed by pressure oxidation and the CIL treatment of POX cakes. The study is aimed to optimize the processing of low-grade (Au 0.6 g/t) refractory gold ore and achieve high process parameters. The study included the following steps: the reduction of organic carbon mass fraction (< 0.6 %) in concentrates reporting to hydrometallurgical treatment; experiments on the hydrometallurgical treatment of flotation concentrates using two process options: pressure oxidation (POX) of the initial flotation concentrate followed by the CIL treatment of POX cakes and preliminary gravity – cleaner flotation of the initial flotation followed by pressure oxidation and the CIL treatment of POX cakes. The research methodology is based on studying the influence of carbon depressant reagents on the flotation properties of organic carbon during the flotation process. When carrying out flotation experiments, the equipment of JSC Irigiredmet was used, installed at the semi-industrial testing site (laboratory mills, mechanical flotation machines and auxiliary equipment). The study is carried out in accordance with generally accepted methods of ore preparation and flotation concentration. The mass fraction of organic carbon in the flotation concentrate decreased from 2.0 to 0.5 %. It has been achieved by the use of new reagents for carbon depression (carbon depression reagents). The products of refractory gold ore flotation using new reagents for carbon depression were flotation concentrates suitable for further hydrometallurgical treatment. According to the experiments on rougher flotation concentrate pressure oxidation and subsequent POX cake cyanide leaching, the recovery of gold on the carbon adsorbent was 83.5 %. Preliminary gravity – cleaner flotation of the concentrate before pressure oxidation improved the loading of gold on the carbon adsorbent to 96.6 %.

Введение. Органический углерод, присутствующий в золотосодержащих рудах, может проявлять высокую сорбционную активность по отношению к растворённому в процессе цианирования золоту. Проявление или отсутствие сорбционной активности органического углерода различных месторождений, а также в пределах одного месторождения зависит от степени его метаморфизма, т.е. от структурного состояния углерода [12].

В процессе метаморфизма происходит постепенное изменение структуры углеродистого вещества от аморфных разновидностей разупорядоченного углерода в трёхмерно-порядоченную структуру графита. Аморфный углерод низших ступеней метаморфизма, обладающий высокой пористостью и дисперсностью, а также большей поверхностной активностью с ненасыщенными углеродными связями, является наиболее

сорбционно-активным по отношению к золоту [2; 9; 11]. В этом случае даже незначительное содержание аморфного органического углерода на уровне 0,1 % в составе руды повлечёт за собой значительные потери золота с хвостами технологического процесса [13].

Соответственно, необходимо разработать технологию, позволяющую эффективно перерабатывать руды, имеющие в своём составе аморфный сорбционно-активный органический углерод.

Актуальность исследования. В связи с истощением запасов легкообогатимых руд в настоящее время в переработку вовлекаются руды сложного вещественного состава, т.е. так называемые «упорные руды» [1; 8; 14]. Упорные золотосодержащие руды, в которых золото распределено на атомарном кластерном уровне в матрице сульфидных минералов, относятся к наиболее распространённому технологически упорному типу руд. Выс-

вободить тонковкрапленное золото возможно только с помощью разрушения кристаллической решётки минерала путём биологического или автоклавного окисления (далее – АО) [3; 10]. После полного АО упорных сульфидных концентратов при температуре 200 °С последующее извлечение золота методом цианирования может достигать 94–98%. Присутствие углеродистого вещества в золотосодержащих рудах является одной из основных причин потери золота в процессе гидрометаллургической переработки. Если в составе перерабатываемого материала присутствует сорбционно активный органический углерод, то извлечение золота цианированием падает на 5–50 % по сравнению с обычными упорными концентратами. Способность органического углерода адсорбировать на своей поверхности растворённое золото называется прег-роббингом [5].

Для предотвращения эффекта прег-роббинга и эффективной переработки упорных руд и концентратов требуется максимально сократить массовую долю органического углерода в продуктах, поступающих на гидрометаллургическую переработку. Одним из таких методов является депрессия органического углерода в процессе флотации с применением реагентов-депрессоров углерода (РДУ). Благодаря введению РДУ в процессе флотации упорной золото-углеродсодержащей руды удаётся сократить не только массовую долю органического углерода, но и сорбционную активность флотоконцентрата, поступающего на дальнейшую гидрометаллургическую переработку.

Объект исследования – процесс флотационного обогащения бедной дважды упорной золотосодержащей руды с применением новых РДУ, а также технология гравифлотоперечистки концентрата основной флотации с последующим АО концентратов и сорбционным цианированием кеков.

Предмет исследования – органический углерод, его поведение и способы удаления, новые реагенты-депрессоры и режимы их применения, режим гравифлотоперечистки, режим и условия применения АО и сорбционного цианирования.

Цель исследования – оптимизация технологии обогащения бедной по содержанию золота руды (0,6 г/т), технологически упорной к процессу цианирования с получением высоких технологических показателей.

Задачи исследования: снижение массовой доли органического углерода на ста-

дии обогащения (ниже 0,6 %) в концентратах, поступающих на гидрометаллургическую переработку, проведение тестовых опытов по гидрометаллургической переработке полученного флотоконцентрата по двум вариантам схем:

1) АО исходного флотоконцентрата с последующим сорбционным цианированием кека;

2) предварительная гравифлотоперечистка исходного флотоконцентрата с последующим АО концентрата перечистки и его сорбционным цианированием.

Методология и методы исследования. Методология исследования основывается на изучении влияния РДУ на флотационные свойства органического углерода в процессе флотации.

При проведении флотационных опытов использовано оборудование Иркутского научно-исследовательского института благородных и редких металлов и алмазов, установленное на участке полупромышленных испытаний (лабораторные мельницы, флотационные машины механического типа и вспомогательное оборудование). Исследования выполнялись в соответствии с общепринятыми методиками рудоподготовки и флотационного обогащения.

Разработанность темы исследования. Вопросом разработки оптимальной технологии переработки упорного золото-углеродсодержащего сырья занимались многие российские и зарубежные учёные, в частности И. Н. Плаксин, В. А. Чантурия, А. В. Афанасова, М. В. Комаров, В. В. Барченков, Л. М. Желтова, Р. Afenya, W. Gnaу, В. Рыке, G.L. Simmons и др.

Предложены различные технологические решения по переработке упорных золото-углеродсодержащих руд, включающие флотационные методы выведения углеродистого вещества в отдельный флотационный продукт на стадии предварительной угольной флотации, подавление органического углерода в процессе флотации с применением реагентов, выступающих в роли депрессоров органического углерода, предварительную обработку руд физико-энергетическими методами воздействия, такими как сверхвысокочастотная, электроимпульсная, магнитно-импульсная, электрохимическая обработки, электродинамическое и ударно-волновое воздействия, а также пирометаллургические и другие методы подготовки руды к металлургической переработке.

Несмотря на изученность темы, проблема переработки сорбционно-активных руд и концентратов остаётся актуальной и имеет научную, а также практическую значимость.

Результаты исследования. В ходе проведения исследований изучено влияние ряда РДУ, относящихся к классу органических полимеров, сложных высокомолекулярных углеводов, а также композитных продуктов органического синтеза с различными модифицирующими добавками [15; 17].

Среди изученных реагентов выбрано два, давших наилучшие технологические показатели. К данным реагентам относятся МДК и Супролост [16]. Использование данных реагентов позволило сократить не только содержание органического углерода во флотоконцентрате с 2 до 0,5%, но и их сорбционную активность с 93 до 52 %. С этим уровнем сорбционной активности концентрат может

быть переработан по CIL-технологии (уголь в растворе выщелачивания).

С использованием данных реагентов разработан оптимальный реагентный режим, представленный в табл. 1.

С целью подавления шламов пустой породы в цикле измельчения предусмотрена подача жидкого стекла (ЖС) с расходом 100 г/т. Оптимальная крупность измельчения руды 75–80 %-го класса – минус 0,071 мм. Подача реагентов РДУ предусмотрена в каждую операцию флотации с общим расходом 250 г/т. Для активации сульфидов, в частности пирита и арсенопирита, в сульфидную флотацию подаётся раствор медного купороса с расходом 50 г/т. Опыты по подбору РДУ проводили по схеме открытого цикла, представленной на рис. 1.

Полученные результаты представлены в табл. 2 и на рис. 2, 3.

Таблица 1 / Table 1

Параметры флотационного процесса / Parameters of flotation experiments

Наименование операции / Process	Расход реагентов, г/т руды / Reagent consumption, g/t of ore					Время флотации, мин / Flotation time, min
	жидкое стекло / Liquid glass	РДУ / CDR	CuSO ₄ / CuSO ₄	БКК / PBX	T-92 / T-92	
Измельчение / Grinding	100	-	-	-	-	$\beta_{71}=75-80\%$
Сульфидная флотация / Sulphide flotation	-	150	50	60	40	2
Основная флотация / Rougher flotation	-	50	-	40	10	4
Контрольная флотация / Scavenger flotation	-	50	-	30	10	5
Итого: / Total:	100	250	50	130	60	11

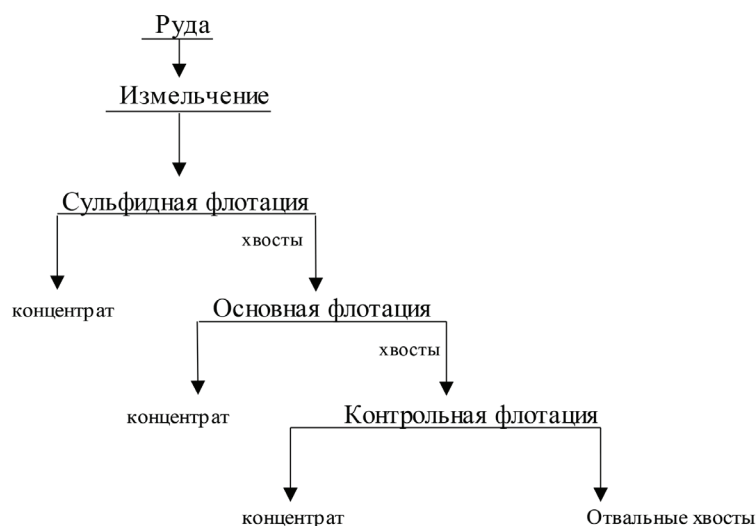


Рис. 1. Схема проведения флотационных опытов в открытом цикле
Fig. 1. Flowsheet of the flotation experiments

Таблица 2 / Table 2

Результаты флотационных тестов с использованием выбранных РДУ / Results of the flotation experiments using selected CDRs

Продукты / Product	Выход, % / Yield, %	Au / Au		C _{орг} / C _{organic}		Тип РДУ / CDR type
		β, г/м / Content, g/t	ε, % / Recovery, %	β, г/м / Content, g/t	ε, % / Recovery, %	
Концентрат сульфидной флотации / Sulphide flotation concentrate	1,54	22,6	56,94	1,56	5,36	Без РДУ / No CDR
Концентрат основной флотации / Basic flotation concentrate	3,00	5,90	28,96	2,80	18,73	
Суммарный концентрат / Total concentrate	4,54	11,56	85,90	2,379	24,09	
Концентрат контрольной флотации / Control flotation concentrate	2,50	1,29	5,28	1,891	10,54	
Хвосты контрольной флотации / Control flotation tailings	92,96	0,06	8,82	0,315	65,37	
Руда по балансу / Ore (balance)	100,00	0,61	100,00	0,448	100,00	
Концентрат сульфидной флотации / Sulphide flotation concentrate	1,10	24,80	43,88	0,43	1,08	
Концентрат основной флотации / Basic flotation concentrate	1,80	14,50	41,98	0,57	2,35	
Суммарный концентрат / Total concentrate	2,90	18,40	85,86	0,52	3,43	
Концентрат контрольной флотации / Control flotation concentrate	2,11	1,80	6,11	0,59	2,84	
Хвосты контрольной флотации / Control flotation tailings	94,99	0,05	8,02	0,43	93,73	
Руда по балансу / Ore (balance)	100,00	0,62	99,99	0,44	100,00	
Концентрат сульфидной флотации / Sulphide flotation concentrate	0,95	25,60	40,02	0,39	0,85	СУПРОЛОСТ / SU-PROLOST
Концентрат основной флотации / Basic flotation concentrate	1,96	14,10	45,44	0,59	2,66	
Суммарный концентрат / Total concentrate	2,91	17,86	85,46	0,53	3,51	
Концентрат контрольной флотации / Control flotation concentrate	2,23	1,24	4,55	0,72	3,69	
Хвосты контрольной флотации / Control flotation tailings	94,86	0,06	9,99	0,43	92,85	
Руда по балансу / Ore (balance)	100,00	0,61	100,00	0,44	100,00	

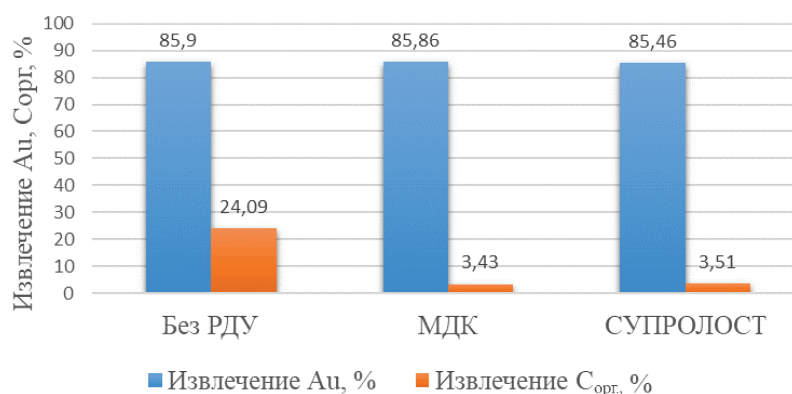


Рис. 2. Зависимость извлечения Au, C_{орг}, % от применяемых РДУ /
Fig. 2. Recovery of Au and Corganic as a function of a CDR type

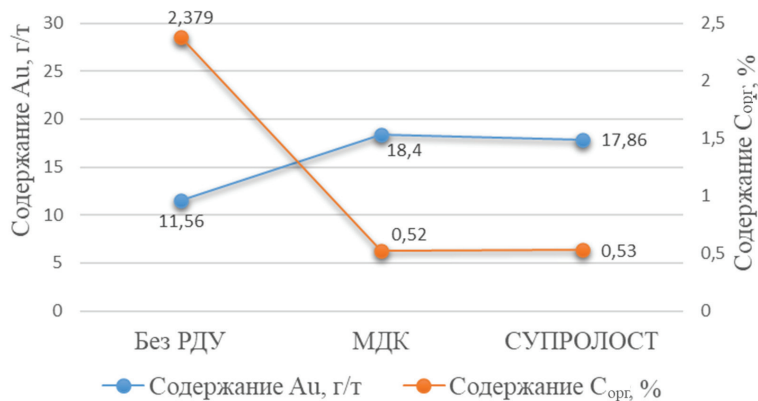


Рис. 3. Зависимость содержания Au г/т, C_{орг}%, от применяемых РДУ /
Fig. 3. Content of Au and Corganic as a function of a CDR type

Как показали проведённые исследования, без применения РДУ в процессе флотации на данной руде получают высокоуглеродистые концентраты с содержанием органического углерода 2,379 % при извлечении золота 85,90 % и содержании золота 11,56 г/т (см. табл. 2, рис. 2, 3). Сорбционная активность данного флотоконцентрата, проверенная по методике Иркутского научно-исследовательского института благородных и редких металлов и алмазов, составила 93 %, что не позволяет вовлекать его в переработку гидрометаллургическим способом, т. к. это приведет к неизбежным потерям золота, вызванным сорбцией металла на поверхности углеродистого вещества (УВ). Такая «паразитная» способность углеродистого вещества носит англоязычное название «прегг-робинг» (preg-robbing). Различают прегг-робинг первого и второго типов. Первый тип – хлоридный или автоклавный прегг-робинг, который проявляется в процессе АО и представляет собой сорбцию золото-хлоридного комплекса на поверхности УВ. Второй тип прегг-робинга происходит в процессе цианирования. Органический углерод, проявляя повышенную сорбционную активность по отношению к золото-цианистому комплексу, сорбирует на своей поверхности растворённое в процессе цианирования золото. Сорбированное золото в обоих видах прегг-робинга уходит в хвосты и не извлекается [4; 6].

При использовании в качестве РДУ МДК содержание органического углерода в суммарном флотоконцентрате снизилось и составило 0,52 %, извлечение золота сохранилось на уровне 85,86 %, но при этом достигнуто качество концентрата до 18,40 г/т золота за счёт сокращения выхода концентрата (см. табл. 2,

рис. 2, 3). Сорбционная активность данного флотоконцентрата снизилась до 52 %.

Использование в качестве РДУ Супрололст позволило снизить содержание органического углерода во флотоконцентрате до 0,53 %, извлечение золота составило 85,46 % при содержании золота 17,86 г/т (см. табл. 2, рис. 2, 3). Сорбционная активность флотоконцентрата составила 60 %. С этим уровнем сорбционной активности концентрат может быть переработан по CIL-технологии (уголь в растворе выщелачивания).

Дальнейшие исследования были направлены на проведение гидрометаллургических тестов по двум вариантам схем:

1) АО исходного флотоконцентрата с последующим сорбционным цианированием кеков АО;

2) предварительная гравифлотоперечистка исходного флотоконцентрата с последующим АО концентрата перечистки и его сорбционным цианированием.

Для реализации тестов наработан флотоконцентрат в замкнутом цикле по схеме, представленной на рис. 4, с применением в качестве депрессора углерода РДУ Супрололст.

В процессе наработки концентрата флотации получен флотоконцентрат с содержанием золота 11,0 г/т, органического углерода – 0,59 %, серы сульфидной – 16,98 %, железа сульфидного – 16,1 %. Извлечение золота в суммарный концентрат составило 87,44 % при выходе 4,82 %. Увеличение выхода флотоконцентрата замкнутого цикла повлекло за собой снижение качества полученного концентрата до 11 г/т (по сравнению с показателями, полученными в открытом цикле флотации, – 17,86 г/т) (табл. 3).

Тестовые опыты по гравифлотоперечистке концентрата проводили по схеме, представленной на рис. 5. Операции гравитационного обогащения осуществляли с использованием лабораторной гидроциклонной установки, оснащённой гидроциклоном ГЦ-26 с углом конусности 20°.

Операцию флотоперечистки вели в лабораторной флотомашине с объёмом камеры 3 л. В процесс дополнительно вводили РДУ Супролост, а также подавали собиратель БКК – 15 г/т, вспениватель Т-92 из расчёта 20 г/т. Результаты гравифлотоперечистки представлены в табл. 4.

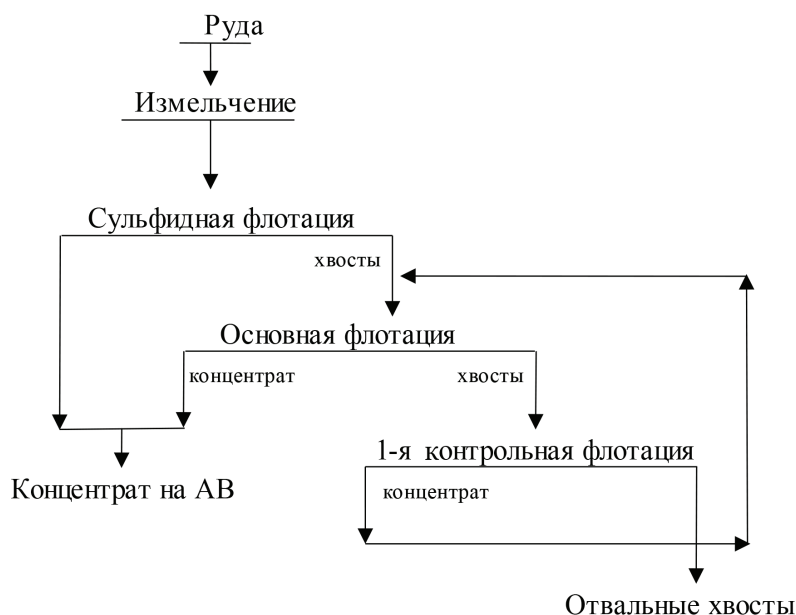


Рис. 4. Схема наработки концентрата для гидрометаллургических тестов в замкнутом цикле / **Fig. 4.** Flowsheet of the concentrate production for closed-cycle hydrometallurgical tests

Таблица 3 / Table 3

Результаты наработки концентратов флотации / Results of the flotation concentrate production

Продукты обогащения / Processing product	Выход, % / Yield, %	Золото / Gold		Органический углерод / Organic carbon		Сера сульфидная / Sulphide sulphur		Железо сульфидное / Sulphide iron	
		β , г/т / Content, g/t	ϵ , % / Recovery, %	β , % / Content, %	ϵ , % / Recovery, %	β , % / Content, %	ϵ , % / Recovery, %	β , % / Content, %	ϵ , % / Recovery, %
Концентрат флотации / Flotation concentrate	4,82	11,00	87,44	0,594	6,47	16,98	92,17	16,10	94,24
Хвосты флотации / Flotation tailings	95,18	0,08	12,56	0,435	93,53	0,070	7,83	0,050	5,76
Руда по балансу / Ore (balance)	100,0	0,606	100,0	0,443	100,0	0,851	100,0	0,827	100,0

В результате гравифлотоперечистки флотоконцентрата, содержащего сульфиды на уровне 35 %, общий выход концентрата перечистки (пески ГЦ) составил 41,81 % при извлечении в него золота и сульфидов выше 90 %, углерода органического – 21,8 %. Содержание золота выросло с 11,00 г/т до 24,8 г/т, а массовая доля углеродистого ве-

щества снизилась с 0,60 до 0,31 %, что свидетельствует о существенном улучшении качества концентрата.

По имеющемуся опыту [7], дополнительная гравифлотоперечистка положительно влияет на качественно-количественные показатели последующего процесса гидрометаллургической переработки концентрата.

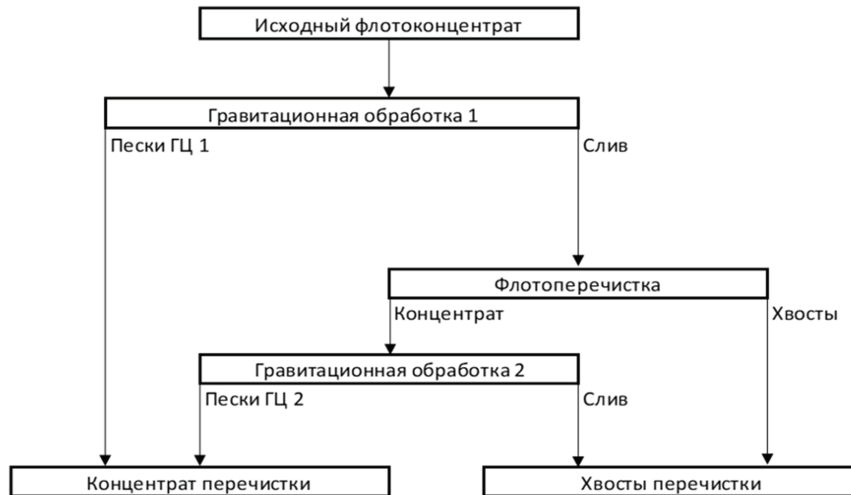


Рис. 5. Схема тестовых экспериментов по гравифлотоперечистке флотоконцентрата / **Fig. 5.** Flowsheet of the experiments on flotation concentrate treatment by gravity-cleaner flotation

Таблица 4 / Table 4

Результаты гравифлотоперечистки флотоконцентрата / Results of gravity – re-cleaning flotation of the flotation concentrate

Продукт / Product	Выход, % / Yield, %	Содержание г/т, % / Content, g/t, %				Распределение, % от исходного / Distribution, %			
		Au / Au	$C_{орг} / C_{organic}$	S_s / S_s	Fe_s / Fe_s	Au / Au	$C_{орг} / C_{organic}$	S_s / S_s	Fe_s / Fe_s
Гравитационная обработка (ГЦ) 1 / Gravity processing (cyclone) 1									
Пески ГЦ 1 / Cyclone underflow 1	36,03	24,86	0,29	35,30	38,20	81,41	17,41	78,11	76,79
Слив ГЦ 1 / Cyclone overflow 1	63,97	3,22	0,77	5,58	6,51	18,59	82,59	21,89	23,21
Исх. продукт / Initial product	100,00	11,00	0,60	16,28	17,92	100,00	100,00	100,00	100,00
Флотоперечистка / Re-Cleaning flotation									
Концентрат / Concentrate	23,70	11,55	1,04	20,30	21,70	15,80	26,44	18,87	18,33
Хвосты / Tailings	76,30	0,64	0,69	0,94	1,71	2,79	56,15	3,02	4,88
Исх. продукт / Initial product	100,00	3,22	0,77	5,58	6,51	18,59	82,59	21,89	23,21
Гравитационная обработка (ГЦ) 2 / Gravity processing (cyclone) 2									
Пески ГЦ 2 / Cyclone underflow 2	38,15	20,70	0,45	33,70	36,60	10,81	4,37	11,95	11,80
Слив ГЦ 2 / Cyclone overflow 2	61,85	5,90	1,40	12,10	12,60	4,99	22,06	6,92	6,54
Исх. продукт / Initial product	100,00	11,55	1,04	20,30	21,70	15,80	26,44	18,87	18,33
Общие пески / Total underflow	41,81	24,28	0,31	35,08	37,98	92,14	21,80	90,20	88,73
Общие хвосты / Total tailings	58,19	1,49	0,80	2,74	3,46	7,86	78,20	9,80	11,27
Итого: / Total:	100,00	11,02	0,60	16,26	17,90	100,00	100,00	100,00	100,00

Полученный концентрат гравифлотоперечистки (общие пески ГЦ), а также исходный флотоконцентрат основной флотации были подвергнуты кислотной обработке серной кислотой при концентрации 10 г/л в течение 1 ч и дальнейшему АО в лабораторном ав-

токлаве с рабочим объёмом 1 л. Существует технология с использованием азотной кислоты [18].

Исходные данные проб, подвергнутых АО, приведены в табл. 5. Результаты АО представлены в табл. 6.

Таблица 5 / Table 5

**Исходные данные концентратов, поступивших на АО /
Initial characteristics of the concentrates reporting to POX**

Проба / Sample	Содержание в исходном концентрате / Content in initial concentrate, %			
	Au, г/т / Au, g/t	Fe _s , % / Fe _s , %	S _s , % / S _s , %	C _{орг} / C _{organic} , %
Исходный флотоконцентрат / Initial flotation concentrate	11,02	16,10	17,00	0,60
Концентрат гравифлотоперечистки / Gravity – re-cleaning flotation concentrate	24,28	37,98	35,08	0,31

Таблица 6 / Table 6

Результаты АО проб / Results of POX

Проба / Sample	Массовая доля, % / Mass fraction, %				Содержание Au в кеке АО, г/т / Content in POX cake, g/t
	Fe _s / Fe _s	S _s / S _s	S _{сульфат.} / S _{sulphate}	C _{орг.} / C _{organic}	
Исходный флотоконцентрат / Initial flotation concentrate	0,98	1,14	0,93	0,78	28,95
Концентрат гравифлотоперечистки / Gravity – re-cleaning flotation concentrate	0,14	0,27	0,29	0,87	87,90

Эффективность процесса АО оценивали по степени разложения сульфидной серы, которая составила 93,0% для исходного флотоконцентрата, 99,2 % – для концентрата гравифлотоперечистки.

Кеки АО подвергали цианированию в агитационном режиме по методике определения сорбционной активности [4]. В качестве сорбента использовали активированный уголь с загрузкой 10 об. %.

Результаты опытов по цианированию проб окисленных продуктов в агитационном режиме показывают, что извлечение золота на угольный сорбент из исходного флотоконцентрата составило 83,5 %, а извлечение золота из концентрата гравифлотоперечистки – 96,6 %.

Сорбционная активность кека АО от исходного флотоконцентрата оказалась на уровне 63 %, концентрата гравифлотоперечистки – 18,72%, что свидетельствует о существенном улучшении технологического качества продукта.

Сквозное извлечение золота по двум вариантам схем составило:

1) без гравифлотоперечистки концентрата – 72,92 %;

2) с гравифлотоперечисткой концентрата – 77,83%.

Выводы. Предложенные РДУ МДК и Супролост позволяют получить флотоконцентраты с содержанием органического углерода менее 0,6 %, что соответствует поставленной цели выполнения работ по оптимизации технологии обогащения упорной руды для автоклавного вскрытия с последующим сорбционным цианированием. За счёт использования РДУ в процессе флотации происходит повышение качества получаемого концентрата по золоту, благодаря подавлению шламов пустой породы, без снижения показателей по извлечению золота на уровне 85 %.

Гравифлотоперечистка флотоконцентрата основной флотации, как дополнительная операция предварительной подготовки материала к цианированию, позволила сократить массовую долю органического углерода в нём с 0,6 до 0,31 %, снизить его сорбционную активность с 63 до 18,72 %. Снижение сорбционной активности положительно повлияло на показатели последующего процесса гидрометаллургической переработки и дало прирост извлечения по золоту на уровне 13 % от операции и на уровне 5 % от руды.

Список литературы

1. Александрова Т. Н., Хайдэ Г., Афанасова А. В. Оценка упорности золотосодержащих руд на основе интерпретации данных термического анализа // Записки Горного института. 2019. Т. 235. С. 20–37.
2. Баликов С. В., Богородский А. В., Болдырев А. В., Гудков С. С., Дзгоев Ч. Т., Емельянов Ю. Е., Епифоров А. В. Автоклавное окисление золотосодержащих руд и концентратов. Иркутск: Иргиредмет, 2016. 471 с.

3. Баликов С. В., Дементьев В. Е. Золото: свойства. Геохимические аспекты. Иркутск: Иргиредмет, 2015. 326 с.
4. Барченков В. В. Сорбционная активность золотосодержащих руд и технологии их переработки // Золотодобыча. 2021. № 6. С. 15–19.
5. Воробьев-Десятковский Н. В., Епифанов А. В. Автоклавное окисление дважды упорных золотосодержащих руд. Проблемы и пути решения // Минерально-сырьевой комплекс России – новые рубежи и вызовы: X Горнопромышленный форум. М., 2014.
6. Гордеев Г. В., Петров А. В., Хасанов О. В., Северинова Д. В. Обзор современных технологий переработки упорных золотосодержащих руд и концентратов с применением азотной кислоты // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333, № 1. С. 214–224.
7. Дементьева Н. А., Муллоу В. М., Бывальцев В. В. Испытания инновационной технологии переработки углистой золотосодержащей руды // Сборник трудов АО «Иргиредмет». Иркутск, 2022. 8 с.
8. Захаров Б. А., Меретуков М. А. Золото: упорные руды. М.: Руда и Металлы, 2013. 452 с.
9. Меретуков М. А. Золото и природное углеродистое вещество. М.: Руда и Металлы, 2007. 112 с.
10. Мязин В. П., Шумилова Л. В., Минеев Г. Г., Баранов В. В. Переработка упорных сульфидных концентратов, содержащих благородные металлы, на основе бактериального окисления // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2017. № 7. С. 67–78.
11. Развозжаева Э. А. Геохимия углерода и благородных металлов в осадочно-метаморфических комплексах складчатого обрамления сибирской платформы. Новосибирск: Гео, 2015. 135 с.
12. Развозжаева Э. А., Будяк А. Е., Прокочук С. И. Сорбционная активность нерастворимого углеродистого вещества черносланцевых образований в процессе регионального метаморфизма (Байкало-Патомское нагорье) // Геохимия. 2013. № 1.
13. Санакулов К. С., Мустакимов О. М., Эргашев У. А., Ахатов Н. А. О целесообразности применения комбинированных технологий для переработки особо упорных золотосульфидных руд // Цветные металлы. 2016. № 2. С. 9–14.
14. Секисов А. Г., Рубцов Ю. И., Шевченко Ю. С., Лавров А. Ю., Трубачев А. И., Салихов В. С., Петухов А. А. Инновационные геотехнологии освоения труднообогатимого (упорного) минерального сырья // Вестник Забайкальского государственного университета. 2020. Т. 26, № 1. С. 52–59.
15. Топычканова Е. И., Дементьева Н. А. Поиск новых реагентов-депрессоров углерода при флотации упорных золотосодержащих руд // Золотодобыча. 2023. № 8. С. 7–11.
16. Топычканова Е. И., Дементьева Н. А., Чикин А. Ю. Депрессия углеродистого вещества при флотации золота из упорных руд // Материалы международной конференции «Плаксинские чтения – 2023». М., 2023. С. 330–333.
17. Bulatovic S., Wyslouzul D. M. Selection and evaluation of different depressants systems for flotation of complex sulphide ores // Minerals Engineering. 1995. Vol. 8, no. 1/2. P. 63–76.
18. Gordeev D. V., Fomenko I. V., Shneerson Ya. M., Petrov. G. V. Processing of carbonaceous gold-containing concentrates by autoclave oxidation with the addition of nitric acid as a secondary oxidizer // Obogashchenie Rud. 2023. № 5. P. 18–24.

References

1. Alexandrova T. N., Haide G., Afanasova A. V. Assessment of the persistence of gold-bearing ores based on the interpretation of thermal analysis data. Notes of the Mining Institute, vol. 235, pp. 20–37, 2019. (In Rus.)
2. Balikov S. V., Bogorodsky A. V., Boldyrev A. V., Gudkov S. S., Dzgoev Ch. T., Yemelyanov Yu. E., Epiforov A. V. Autoclave oxidation of gold-bearing ores and concentrates. Irkutsk: Irgiredmet, 2016. 471 p. (In Rus.)
3. Balikov S. V., Dementyev V. E. Gold: properties. Geochemical aspects. Irkutsk: Irgiredmet, 2015. 326 p. (In Rus.)
4. Barchenkov V. V. Sorption activity of gold-bearing ores and technologies of their processing. Gold Mining, no. 6, pp. 15–19, 2021. (In Rus.)
5. Vorobyov-Desyatovsky N. V., Epifanov A. V. Autoclave oxidation of doubly resistant gold-bearing ores. Problems and solutions. The mineral resource complex of Russia – new frontiers and challenges: X Mining Forum. Moscow, 2014. (In Rus.)
6. Gordeev G. V., Petrov A. V., Khasanov O. V., Severinova D. V. Review of modern technologies for processing resistant gold-bearing ores and concentrates using nitric acid. Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource Engineering, vol. 333, no. 1, pp. 214–224, 2022. (In Rus.)
7. Dementieva N. A., Mullov V. M., Byvaltsev V. V. Tests of innovative technology for processing carbonaceous gold ore. Proceedings of JSC Irgiredmet. Irkutsk, 2022. 8 p. (In Rus.)
8. Zakharov B. A., Meretukov M. A. Gold: stubborn ores. Moscow: Ore and Metals, 2013. 452 p. (In Rus.)
9. Meretukov M. A. Gold and natural carbonaceous matter. Moscow: Ore and Metals, 2007. 112 p. (In Rus.)

10. Myazin V. P., Shumilova L. V., Mineev G. G., Baranov V. V. Processing of resistant sulfide concentrates containing precious metals based on bacterial oxidation. *News of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*, no. 7, pp. 67–78, 2017. (In Rus.)
11. Razvozhzaeva E. A. Geochemistry of carbon and precious metals in sedimentary-metamorphic complexes of the folded frame of the Siberian platform. Novosibirsk: Geo, 2015. 135 p. (In Rus.)
12. Razvozhzaeva E. A., Budyak A. E., Prokopchuk S. I. Sorption activity of insoluble carbonaceous matter of black shale formations in the process of regional metamorphism (Baikal-Patom upland). *Geochemistry*, no. 1, 2013. (In Rus.)
13. Sanakulov K. S., Mustakimov O. M., Ergashev U. A., Akhatov N. A. On the expediency of using combined technologies for processing especially resistant gold sulfide ores. *Non-Ferrous Metals*, no. 2, pp. 9–14, 2016. (In Rus.)
14. Sekisov A. G., Rubtsov Yu. I., Shevchenko Yu. S., Lavrov A. Yu., Trubachev A. I., Salikhov V. S., Petukhov A. A. Innovative geotechnologies for the development of hard-to-enrich (resistant) mineral raw materials. *Transbaikal State University Journal*, vol. 26, no. 1, pp. 52–59, 2020. (In Rus.)
15. Topychkanova E. I., Dementieva N. A. Search for new carbon depressant reagents during flotation of resistant gold-bearing ores. *Gold Mining*, no. 8, pp. 7–11, 2023. (In Rus.)
16. Topychkanova E. I., Dementieva N. A., Chikin A. Yu. Depression of carbonaceous matter during flotation of gold from stubborn ores. Proceedings of the international conference “Plaksin readings – 2023”. Moscow, 2023. P. 330–333. (In Rus.)
17. Bulatovic S., Wyslouzul D. M. Selection and evaluation of different depressants systems for flotation of complex sulphide ores. *Minerals Engineering*, vol. 8, no. 1/2, pp. 63–76, 1995. (In Eng.)
18. Gordeev D. V., Fomenko I. V., Shneerson Ya. M., Petrov. G. V. Processing of carbonaceous gold-containing concentrates by autoclave oxidation with the addition of nitric acid as a secondary oxidizer. *Obogashchenie Rud*, no. 5, pp. 18–24, 2023. (In Eng.)

Информация об авторах

Топычканова Екатерина Ивановна, младший научный сотрудник, Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов, г. Иркутск, Россия; topychkanovaE@irgiredmet.ru. Область научных интересов: исследования, обогащение, разработка технологий.

Деметьева Наталья Аркадьевна, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов, г. Иркутск, Россия; dema@irgiredmet.ru. Область научных интересов: исследование и разработка технологических схем переработки золото-углеродсодержащих руд, поиск эффективных депрессоров органического углерода при переработке золото-серебросодержащих и полиметаллических руд.

Муллов Владимир Михайлович, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов, г. Иркутск, Россия; Mullov@irgiredmet.ru. Область научных интересов: исследование и разработка технологий переработки сорбционноактивных золотосодержащих руд.

Чикин Андрей Юрьевич, д-р техн. наук, профессор, Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия; anchik53@mail.ru. Область научных интересов: исследование и разработка природоохранных технологий очистки производственных сточных вод, технологий глубокой переработки полезных ископаемых с использованием физико-химических методов и процессов.

Information about the authors

Topychkanova Ekaterina I., junior researcher, Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds, Irkutsk, Russia; TopychkanovaE@irgiredmet.ru. Research interests: research, enrichment, technology development.

Dementieva Natalia A., leading researcher, Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds, Irkutsk, Russia; dema@mail.ru. Research interests: research and development of processes for the treatment of carbonaceous gold ores; study of effective organic carbon depressors for the processing of gold, silver and polymetallic ores.

Mullov Vladimir M., leading researcher, Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds, Irkutsk, Russia; Mullov@irgiredmet.ru. Research interests: research and development of methods for the processing of preg-robbing gold ores.

Chikin Andrey Yu., doctor of technical sciences, professor, Irkutsk State University, Irkutsk, Russia; anchik53@mail.ru. Research interests: research and development of environmental technologies for industrial wastewater treatment, technologies for deep processing of minerals using physico-chemical methods and processes.

Вклад авторов в статью

Топычканова Е. И. – разработка концепции статьи, проведение флотационных исследований, обзор отечественной и иностранной литературы, написание текста.

Дементьева Н. А. – разработка методологии исследования, расчёты показателей, оформление текста статьи.

Муллов В. М. – проведение гидрOMETаллургических исследований, обработка и анализ полученных результатов.

Чикин А. Ю. – разработка концепции статьи, рекомендации по её оформлению, формулировка выводов.

The authors' contribution to the article

Topychkanova E. I. – development of the article concept, flotation studies, review of domestic and foreign literature, text writing.

Dementieva N. A. – development of research methodology, calculations of indicators, writing the text of the article.

Mullov V. M. – conducting hydrometallurgical studies, processing and analyzing the results obtained

Chikin A. Yu. – development of the article concept, recommendations on its design, formulation of conclusions.

Для цитирования

Топычканова Е. И., Дементьева Н. А., Муллов В. М., Чикин А. Ю. Оптимизация технологии обогащения бедной технологически упорной золото-углеродсодержащей руды // Вестник Забайкальского государственного университета. 2024. Т. 30, № 3. С. 89–100. DOI: 10.21209/2227-9245-2024-30-3-89-100.

For citation

Topychkanova E. I., Dementieva N. A., Mullov V. M., Chikin A. Yu. Optimization of Low-Grade Refractory Gold Ore Processing // Transbaikal State University Journal. 2024. Vol. 30, no. 3. P. 89–100. DOI: 10.21209/2227-9245-2024-30-3-89-100.