

Металлургия чёрных, цветных и редких металлов

Metallurgy of ferrous, non-ferrous and rare metals

Научная статья

УДК 622.75/.77:669.213.63

DOI: 10.14529/met240401

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ГРАВИТАЦИОННО-ЦИАНИСТОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ВЫСОКОСОРБЦИОННО-АКТИВНОЙ РУДЫ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ПЕРЕХОДОМ НА ГРАВИТАЦИОННО-ФЛОТАЦИОННО-ЦИАНИСТУЮ СХЕМУ

А.В. Бывальцев, torrot_2008@mail.ru

М.А. Винокурова, vma@irgiredmet.ru

Г.И. Войлошников, greg@irgiredmet.ru

АО «Иргиредмет», Иркутск, Россия

Аннотация. Цель – разработка и внедрение на золотоизвлекательной фабрике гравитационно-цианистой технологии переработки высокосорбционно-активной руды одного из месторождений Российской Федерации с последующим переходом на гравитационно-флотационно-цианистую технологию. Массовая доля сульфидной серы и органического углерода в руде – по 0,4 %, основным полезным компонентом является золото в количестве 0,9–1,2 г/т. По рациональному анализу доля золота в цианируемой форме – 81–87 %. Однако из-за крайне высокой сорбционной активности руды в производственных условиях извлечение Au снижается до 54–61 %. С 2011 г. «Иргиредмет» провел лабораторные исследования более чем 50 частных лабораторных проб руды. Пробы руды эффективно обогащаются гравитационными методами, при этом образуются неупорные концентраты с малой или нулевой сорбционной активностью. Для 6 крупнотоннажных проб (массой 5–90 т) выполнен полный цикл НИР, включая полупромышленные и опытно-промышленные испытания по нескольким вариантам схем: прямое цианирование, гравитационно-цианистая схема с раздельным цианированием концентрата и хвостов гравитации, гравитационно-флотационно-цианистая с цианированием концентратов и высокотемпературной обработкой хвостов цианирования. Гравитационно-цианистая схема при выходе концентрата 1,2 % обеспечила прирост сквозного извлечения Au из руды в среднем на 9 % по сравнению с технологией прямого цианирования – до уровня 63–69 %. Гравитационно-флотационно-цианистая схема обеспечила прирост извлечения золота из руды до 77,2–77,4 %. В 2023–2024 гг. институтом «Иргиредмет» разработан технологический регламент для гравитационно-цианистой схемы и проект модернизации золотоизвлекательной фабрики. Внедряемая гравитационно-цианистая схема является «плацдармом» для более глубокой модернизации золотоизвлекательной фабрики с переводом ее на гравитационно-флотационно-цианистую схему.

Ключевые слова: переработка золотосодержащих руд, сорбционно-активная руда, органический углерод, золото, гравитационно-флотационное обогащение, цианирование, золотоизвлекательная фабрика

Для цитирования: Бывальцев А.В., Винокурова М.А., Войлошников Г.И. Разработка и внедрение гравитационно-цианистой технологии переработки высокосорбционно-активной руды с последующим переходом на гравитационно-флотационно-цианистую схему // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2024. Т. 24, № 4. С. 5–16. DOI: 10.14529/met240401

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF A GRAVITY-CYANIDATION TECHNOLOGY FOR PROCESSING OF HIGHLY PREG-ROBBING GOLD ORE WITH THE SUBSEQUENT TRANSFER TO A GRAVITY-FLOTATION-CYANIDATION FLOWSHEET

A.V. Byvaltsev, torrot_2008@mail.ru

M.A. Vynokurova, vma@irgiredmet.ru

G.I. Voiloshnikov, greg@irgiredmet.ru

Irgiredmet, JSC, Irkutsk, Russia

Abstract. This paper is devoted to development and implementation of a gravity + cyanidation technology for processing of highly preg-robbing gold ore from one of the Russian deposit with the subsequent transition to gravity + flotation + cyanidation technology. The ore contains 0.4 % of sulfide sulfur and 0.4 % of organic carbon. The main component of economical interest is gold 0.9–1.2 g/t. There is 81–87 % of cyanidable gold in ore according to a diagnostic leaching results. However, gold recovery decreases to 54–61 % under plant conditions due to the extremely high ore preg-robbing activity. Since 2011, Irgiredmet has conducted laboratory studies of more than 50 laboratory ore samples. It was shown that gravity is efficient method of gold concentration with generation of non-refractory gravity concentrates with low preg-robbing. For 6 bulk samples (from 5 to 90 tons mass), a extensive R&D program was performed, including semi-industrial and pilot tests for several process flowsheet options: direct cyanidation, gravity + cyanidation scheme with separate cyanidation of gravity concentrate and gravity tailings, and gravity-flootation-cyanidation with cyanidation of concentrates and high-temperature treatment of cyanidation tailings. The gravity-cyanidation scheme with a concentrate mass yield of 1.2 % provided an increase in total gold recovery by an average of 9 % compared to the direct cyanidation technology (recovery 63–69 %). The gravity-flootation-cyanidation scheme provided an increase of gold recovery up to 77.2–77.4 %. In 2023–2024, Irgiredmet developed technological regulations for the gravity-cyanidation flowsheet and a project design for the modernization of the mill. The introduced gravity-cyanidation flowsheet is a “springboard” for a more in-depth modernization of the plant with its transfer to the gravity-flootation-cyanidation flowsheet.

Keywords: gold ore processing, preg-robbing ore, organic carbon, gold, gravity, flotation, cyanidation, gold recovery plant

For citation: Byvaltsev A.V., Vynokurova M.A., Voiloshnikov G.I. Development and implementation of a gravity-cyanidation technology for processing of highly preg-robbing gold ore with the subsequent transfer to a gravity-flootation-cyanidation flowsheet. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy.* 2024;24(4):5–16. (In Russ.) DOI: 10.14529/met240401

Введение

Проблеме переработки углистых сорбционно-активных золотых руд посвящено большое количество публикаций, которые отражены в обзорах [1–7]. Технология извлечения золота из таких продуктов предполагает использование более сильных адсорбентов (активные угли и ионообменные смолы для процессов сорбционного цианирования CIL и RIL) [8], а также проведение операций, связанных с удалением углистого вещества гравитационными или флотационными методами либо окислительным обжигом [9–14]. Также используется реагентная обработка углистого вещества, подавляющая его сорбционную активность: обработка окислителями, органиче-

скими соединениями, биореагентами [15–18]. Кроме того, для повышения извлечения золота применяют схемы гравитационного и гравитационно-флотационного обогащения, в том числе гравиоперечистку флотоконцентратов [19] с переработкой гравиоконцентратов в отдельном цикле, снижая соотношение Au:Сорг в материале, подвергаемом цианированию, и потери золота при этом. Кроме того, снижение потерь с хвостами выщелачивания углистых руд возможно также за счет проведения дополнительной стадии высокотемпературного цианирования (процесс HiTeCC) [20–22].

Институт «Иргиредмет» активно вовлечен в поиск путей решения проблем, возникающих при переработке углистых золотосо-

держащих руд. За последние годы проведены несколько поисковых исследований по разработке инновационных методов переработки таких руд и методик их исследования. Также проведены полноценные технологические исследования для сорбционно-активных золотых руд более чем 30 месторождений, в данной статье приведены результаты для руд одного из них.

Одно из крупных золотодобывающих предприятий на Дальнем Востоке России с 2011 г. вело переработку легкоцианируемой руды по технологии прямого цианирования с ионообменной смолой (RIL-процесс) при показателе извлечения золота более 90 %. В последние годы производительность золотоизвлекательной фабрики (ЗИФ) по руде составляла не менее 3,6 млн т в год, однако запасы легкоцианируемых руд были практически исчерпаны к 2024 г.

Начиная с 2011 г. при участии «Иргиредмета» в качестве альтернативного сырья для ЗИФ рассматривались руды близлежащего месторождения, которые характеризуются ярко выраженной сорбционной активностью (СА) из-за наличия органического углерода. Лабораторные исследования выполнены бо-

лее чем для 50 частных лабораторных проб (массой 5–500 кг). Для 6 крупнотоннажных проб (массой 5–90 т) выполнен полный цикл НИР, включая полупромышленные и опытно-промышленные испытания по нескольким вариантам схем (прямое цианирование, гравитационно-цианистая и гравитационно-флотационно-цианистая схемы). В статье речь пойдет о крупнотоннажных пробах руды последних лет, наиболее представительно отобранных в ходе планомерного освоения месторождения. Цель исследований – разработка и внедрение экономически эффективной гравитационно-цианистой технологии переработки упорной высокосорбционно-активной руды с дальнейшим внедрением гравитационно-флотационно-цианистой схемы.

Объект исследований

Основными рудообразующими компонентами руды являются железо и сера. Массовая доля общего железа составляет ~ 3,0 %, с преобладанием оксидной формы ~ 2,5 %. Массовая доля сульфидной серы и органического углерода (C_{opr}) по ~ 0,4 %. Основным полезным компонентом в рудах является золото в количестве 0,9–1,2 г/т. В табл. 1 приве-

Минеральный состав руды

Mineral composition of the ore

Таблица 1

Table 1

Минералы, группы минералов	Массовая доля, %	
	Проба 2021 г.	Проба 2023 г.
Кварц	34,0	34,0
Полевые шпаты (плагиоклазы, ортоклаз)	44,0	41,0
Слюдисто-гидрослюдистые минералы (мусковит, серицит, гидросерицит), хлорит	13,0	16,0
Карбонаты (анкерит, сидерит, кальцит)	4,8	5,4
Сульфиды, в том числе:		
тирит, марказит	1,1	1,0
арсенопирит	0,5	0,6
тирротин, халькопирит, сфалерит, галенит	0,6	0,4
Гидроксиды железа (лимонит, гетит, гидрогетит)	Редкие и единичные зерна	Редкие и единичные зерна
Скородит, ярозит	1,5	1,1
Оксиды титана (рутит, лейкоксен)	0,1	0,1
Барит	0,5	0,4
Апатит	0,1	0,3
Углеродистое вещество	0,3	0,2
Аксессорные минералы: магнетит, циркон, монацит	0,6	0,5
Итого:	Редкие и единичные зерна	Редкие и единичные зерна
	100,0	100,0

ден минеральный состав двух крупнотоннажных проб руды типового для данного месторождения состава. Руды на 95,8–96,8 % состоят из породообразующих минералов, сульфиды представлены в основном пиритом, марказитом (0,5–0,6 %) и арсенопиритом (0,4–0,6 %), практически полностью вскрываемыми при измельчении руды до крупности 0,1 мм. Углеродистое вещество представляет собой аморфную разновидность разупорядоченного углерода – рентгеноаморфный кероген (0,5–0,6 %), а также присутствует в виде битумоидов.

В рудах преобладает мелкое, тонкое и тонкодисперсное золото (минус 0,071 мм) на уровне 85–97 %, на долю крупного золота (плюс 0,071 мм) приходится 3–15 %. Частиц золота крупнее 0,25 мм в изученных пробах руды не обнаружено.

По результатам рационального анализа доля свободного (амальгамируемого) золота составила 38–45 %, доля золота в цианируемой форме – 81–87 %. В упорной, недоступной цианированию форме находится 13–19 % золота, из них 4–6 % ассоциировано с сульфидами, 4–5 % тонко вкра�лено в породообразующие минералы, 2–3 % вкра�лено в углероде, остальное заключено в минералах, растворимых в NaOH и HCl.

Однако в первую очередь упорность всех без исключения изученных проб руды связана с их крайне высокой СА из-за органического углерода. В стандартных бутылочных тестах концентрация Au в жидкой фазе хвостов цианирования проб руды (без искусственного сорбента) не превышает 0,02–0,03 мг/дм³, что соответствует величине СА 95–97 % (по методике института «Иргиредмет» рассчитывается как доля растворимого золота, сорбируемого твердой фазой пульпы в ходе опытов по цианированию без добавки искусственного сорбента). В противоточном сорбционном процессе столь низкая концентрация Au в жидкой фазе не позволяет насыщать сорбент, в результате чего извлечение Au падает до 54–61 % (в среднем 57 %). Другими словами, извлечение, полученное по рацанализу, принципиально недостижимо в производственных условиях из-за высокой СА сырья.

Для изучения руды применен полный набор технологических методик по разработке технологии переработки руды, включая гравитационные и флотационные тесты, тесты по цианированию на бутылочном агитаторе, а также укрупненно-лабораторные, полуза-

водские и опытно-промышленные испытания в замкнутом цикле с полным оборотом продуктов и растворов.

В качестве аналитических методов использованы пробирный и пробирно-атомно-абсорбционный анализ на Au и Ag, ICP-AES анализ жидкой и твердой фаз на 30 элементов, атомно-абсорбционный анализ на Au, количественный рентгенофлуоресцентный, рентгеноспектральный анализ, рентгеноструктурный фазовый анализ на аппарате XRD-6000 (Shimadzu), минералогический анализ проб руды и концентратов, ИК-спектрометрический анализ на органический углерод и серу, фазовый анализ на Au, Fe и S, сцинтиляционный анализ, атомно-эмиссионный анализ Au, озоление с последующим царсководочным растворением и атомно-абсорбционным анализом растворов для определения содержания Au в ионообменных смолах и активных углях, исследования на сканирующем электронном микроскопе TESCAN TIMA, волюметрические методы определения NaOH, CaO, NaCN в жидкой фазе, потенциометрия.

Гравитационно-цианистая схема

Тестовые исследования показали, что все изученные руды достаточно эффективно обогащаются гравитационными методами – извлечение Au в E-GRG-тестах достигает 70–80 % при выходе концентрата 1–5 % и при этом образуются неупорные или малоупорные концентраты с показателем цианирования на уровне 85–95 % и малой СА на уровне 0–20 %. Это значит, что существует возможность посредством гравитационного обогащения выделить часть золота в неупорный продукт и процианировать его отдельно с более высокими показателями, чем при прямом цианировании руды, что в конечном итоге обеспечивает прирост сквозного извлечения Au.

В 2021–2023 гг. были проведены детальные исследования гравитационно-цианистой схемы с прицелом на внедрение данной технологии на вышеупомянутой ЗИФ. Выполнены следующие виды работ:

- обоснована двухстадийная схема гравитации – на первой стадии использован более дешевый и менее обводненный классический гравитационный узел «отсадочная машина + концентрационный стол», извлекающий относительно крупное золото, на второй стадии – центробежные концентраторы (ЦК), доизвлекающие тонкое золото;

• обоснован выход объединенного концентратата гравитации на уровне 1,2 %, так как дальнейшее повышение выхода приводит лишь к незначительному повышению извлечения Au в концентраты, но существенно снижает его качество по С_{орг} (образуются концентраты с высокой СА);

• определена невозможность выделения «золотой головки» в ходе обогащения, содержание Au в наиболее богатой фракции не превышает 2 кг/т. Для переработки объединенного гравиоконцентратата и хвостов гравитации рекомендованы раздельные CIL-процессы;

• проведены исследования и опытно-промышленные испытания по обезуглероживанию хвостов гравитации перед цианированием методами гидроклассификации и флотации. Несмотря на заметное снижение СА хвостов гравитации и повышение операционного извлечения Au при их цианировании на ~ 5 %, потери Au с высокоуглистой фракцией оказались неприемлемо высоки так, что сквозное извлечение Au с операцией обезуглероживания оказалось приблизительно таким же, как и без нее. Операция обезуглероживания не дала искомого эффекта;

• оптимизированы условия цианирования хвостов и концентратата гравитации. Для хвостов гравитации изучено несколько органических реагентов-подавителей СА углерода в

цианистом процессе, наилучшее результаты дало дизельное топливо (0,5 кг/т) – СА снижена с 95–99 до 70–80 %, операционное извлечение Au при цианировании повышенено на 5–10 %;

• подробно изучены три сорбента для цианирования продуктов обогащения: низкоосновная и высокоосновная ионообменные смолы и активный уголь. Проведены непрерывные испытания с противотоком сорбента. Наилучшие технико-экономические показатели обеспечил активный уголь, который и был выбран для технологии;

• проведены многочисленные полу- и опытно-промышленные испытания разработанной гравитационно-цианистой схемы, извлечение Au в гравиоконцентрат находилось в пределах 50–65 %, извлечение Au из гравиоконцентратата – в пределах 87–95 %, извлечение Au из хвостов гравитации – в пределах 25–40 %, сквозное извлечение золота из руды – в пределах 63–69 %. В табл. 2 приведены результаты заключительных опытно-промышленных испытаний на пробе руды массой 90 т.

Таким образом, гравитационно-цианистая схема обеспечила прирост сквозного извлечения Au из руды в среднем на 9 % по сравнению с технологией прямого цианирования.

Таблица 2

Table 2

Результаты опытно-промышленных испытаний
гравитационно-цианистой технологии переработки руды

The results of pilot tests of gravity cyanide ore processing technology

Показатели		Значения	
Содержание Au в руде, г/т		0,955	
Гравитация	Гравиоконцентрат	Выход, % (от руды)	1,091
		Содержание Au, г/т	54,54
		Извлечение Au, % (от руды)	62,3
	Хвосты гравитации	Выход, % (от руды)	98,909
		Содержание Au, г/т	0,364
		Извлечение Au, % (от руды)	37,7
Цианирование продуктов обогащения	Гравиоконцентрат	Операционное извлечение при цианировании, %	89,5
		Сквозное извлечение Au из концентратата, % (от руды)	55,8
	Хвосты обогащения (гравитации / флотации)	Операционное извлечение при цианировании, %	26,7
		Сквозное извлечение Au из хвостов обогащения, % (от руды)	10,0
Итого		Суммарное сквозное извлечение Au из руды, %	65,8

В 2023 г. был разработан технологический регламент (ТР) процесса переработки рассматриваемой руды на вышеупомянутой ЗИФ с максимальным использованием существующего на ней оборудования. Схема ТР включает следующие основные операции: дробление руды, двухстадиальное измельчение (МПСИ + МШЦ), двухстадиальное гравитационное обогащение руды («отсадка – стол» и центробежные концентраторы), раздельное сорбционное цианирование объединенного гравиоконцентратата и хвостов гравитации

с применением активного угля, десорбция золота из насыщенного угля и вторичное концентрирование, термическая реактивация оборотного угля, электролиз богатых элюатов, плавка катодных осадков на сплав Доре. Сквозное извлечение золота из руды в конечную продукцию заложено на уровне 66,3 % при его содержании в руде 1,12 г/т. Принципиальная схема технологии представлена на рис. 1, расход материалов и реагентов на технологию приведен в табл. 3.



Рис. 1. Принципиальная схема гравитационно-цианистой технологии переработки высокосорбционно-активной руды, заложенная в технологический регламент
Fig. 1. Schematic diagram of the gravitational cyanide technology for processing highly sorption-active ore, incorporated into the technological regulations

Таблица 3
Расход реагентов по гравитационно-цианистой технологии
Reagent consumption by gravity cyanide technology

Table 3

Наименование реагентов	Удельный расход материалов и реагентов		
	Химически чистый реагент (100 %), кг на 1 т руды	Содержание основного вещества по ГОСТ (не менее), масс. %	Технический реагент / материал, кг на 1 т руды
Шары помольные	—	—	2,0
Футеровка мельниц 1-й стадии	—	—	0,1
Футеровка мельниц 2-й стадии	—	—	0,2
Футеровка щековой дробилки	—	—	0,05
Известь (CaO)	1,06	50	2,12
Цианид натрия (NaCN)	0,84	98	0,85
Гидроксид натрия (NaOH)	0,15	94	0,16
Активный уголь	—	—	0,077
Флокулянт	—	—	0,018
Дизельное топливо	—	—	0,50
Соляная кислота (техн.)	—	37	0,21

Гравитационно-флотационно-цианистая схема

Руда и хвосты гравитационного обогащения рассматриваемой руды достаточно хорошо обогащаются посредством сульфидной флотации, которая позволяет провести селекцию Au и С_{ор} и снизить упорность золота в составе флотоконцентратов по сравнению с хвостами гравитации, что в конечном итоге повышает сквозное извлечение Au из руды. Тем не менее образуются флотоконцентраты с высокой СА на уровне 80–90 %, что требует применения специальных методов их получения и переработки.

Начиная с 2011 г. параллельно с НИР по гравитационно-цианистой схеме «Иргиредмет» проводил исследования по гравитационно-

флотационно-цианистой схеме. Гравитационный узел принят аналогичным гравитационно-цианистой схеме, то есть на первой стадии применен узел «отсадка – стол», на второй стадии центробежные концентраторы с суммарным выходом концентрата ~ 1,2 %.

На нескольких десятках проб, включая многотоннажные, проведены детальные исследования по флотации хвостов гравитации и цианированию флотоконцентратов:

- оптимизирован режим флотационного обогащения и расход реагентов, который приведен в табл. 4;

- проведены исследования по подбору реагентов-подавителей флотации углерода. Оптимальной оказалась добавка реагента Р-2 в количестве 150 г/т, которая снижает СА

Режимные параметры флотационного обогащения хвостов гравитации

Table 4

Regime parameters of flotation enrichment of gravity tails

Table 4

Операция	Расход реагента на 1 т, г				Продолжительность флотации, мин	Содержание твердого, %
	Р-2	БКК*	ТАФ-7Ж**	Т-92		
I Основная флотация	100	120	12	50	2	
II Основная флотация	50	40	—	—	6	25–28
Контрольная флотация	—	40	—	25	15	
Перечистная флотация	—	—	—	—	2	8–12

* ББК – бутиловый ксантогенат калия;

** ТАФ-7Ж – натриевая соль динизопропилдитиофосфорной кислоты.

концентратов с 80–90 до 70–80 % (снижение расхода Р-2 приводит к резкому повышению СА и снижению сквозного извлечения Au, повышение расхода приводит к неприемлемому повышению потерь Au с хвостами флотации);

- оптимизирован режим CIL-цианирования флотоконцентратов, рекомендовано использовать добавку ДТ в количестве 3 кг/т, которая снижает СА твердой фазы до ~ 50 % и повышает операционное извлечение Au из концентратов на 5–10 %;

- для доизвлечения золота, сорбированного твердой фазой пульпы хвостов цианирования флотоконцентратов и гравиоконцентратов (золота, потеряного из-за эффекта прегрэробинга), были изучены процессы высокотемпературной обработки хвостов CIL. Изучено две модификации высокотемпературного процесса – сорбционная обработка (так называемое горячее цианирование) и отмывка на фильтре, запатентованная «Иргиредметом». Показано, что эффективная продолжительность этих процессов составляет не более

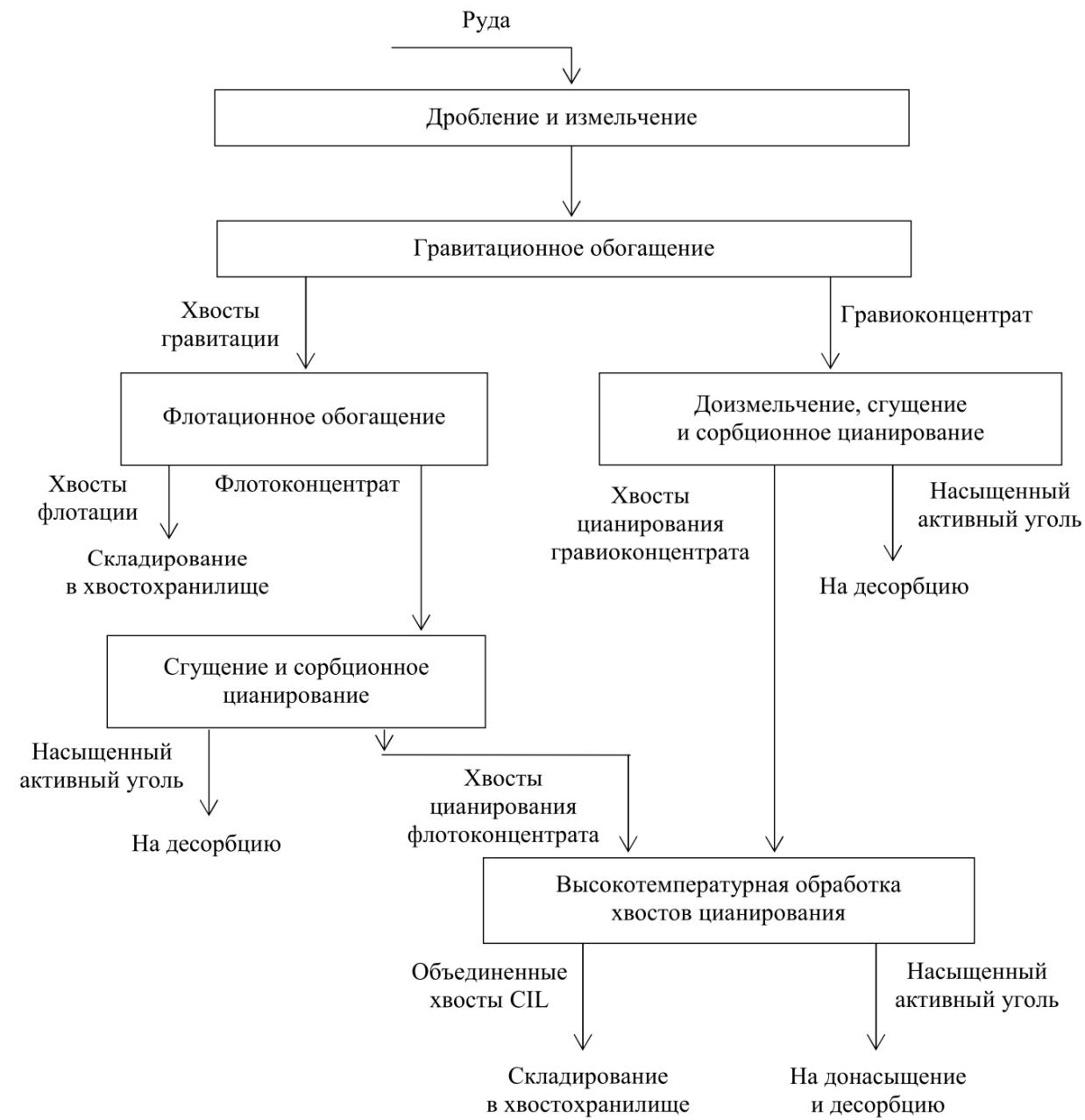


Рис. 2. Принципиальная схема испытанной гравитационно-флотационно-цианистой технологии переработки высокосорбционно-активной руды

Fig. 2. Schematic diagram of the tested gravity-flotation-cyanide technology for processing highly sorption-active ore

0,5 ч при соразмерном операционном извлечении Au на уровне 20–30 %. Использование реагентов (NaOH и NaCN) на высокотемпературной стадии дало незначительный прирост извлечения Au (2–3 %), но оказалось нерентабельным;

• в 2024 г. проведены полупромышленные испытания на массе руды 5 т по гравитационно-флотационно-цианистой схеме с применением высокотемпературной стадии, схема

проведения испытаний приведена на рис. 2, результаты испытаний – в табл. 5. Извлечение Au в гравиоконцентрат составило 53,9 %, во флотоконцентрат – 33,1 %, операционное извлечение Au из гравиоконцентрата – 91,9 %, из флотоконцентрата – 73,4 %, из объединенных хвостов CIL (смесь хвостов CIL-цианирования гравио- и флотоконцентратов) – 25,9–27,0 %, сквозное извлечение золота из руды – 77,2–77,4 %.

**Результаты полупромышленных испытаний гравитационно-флотационно-цианистой
технологии переработки высокосорбционно-активной руды**

Таблица 5

**Results of semi-industrial tests of gravity-flotation-cyanide technology
for processing highly sorption-active ore**

Table 5

Показатели		Значения	
Содержание Au в исходной руде, г/т		0,890	
Гравитационное обогащение	Выход гравиоконцентрата, %	1,220	
	Содержание Au в концентрате, г/т	39,3	
	Извлечение Au в гравиоконцентрат, %	53,9	
	Содержание Au в хвостах гравитации, г/т	0,412	
Сульфидная флотация	Расход углеподавителя, г/т	150	
	Выход флотоконцентрата, %	2,134	
	Содержание Au в концентрате, г/т	13,80	
	Извлечение Au во флотоконцентрат, % (от руды)	33,1	
	Содержание Au в хвостах флотации, г/т	0,12	
	Потери Au с хвостами флотации, % (от руды)	13,0	
	Суммарное сквозное извлечение Au в концентраты, %	87,0	
Цианирование гравиоконцентрата в динамическом режиме	Содержание Au в хвостах CIL, г/т	3,19	
	Операционное извлечение Au, %	91,9	
	Потери Au с хвостами цианирования гравиоконцентрата, % (от руды)	4,4	
Цианирование (CIL) флотоконцентратов в динамическом режиме	Содержание Au в хвостах CIL, г/т	3,67	
	Операционное извлечение Au при цианировании, %	73,4	
	Потери Au с хвостами цианирования флотоконцентрата, % (от руды)	8,8	
	Сквозное извлечение Au из концентратов на стадии CIL (от руды), %	73,8	
Высокотемпературная обработка объединенных хвостов CIL (гравио- + флотоконцентраты)	Наименование обработки	Сорбционная обработка	Отмывка на фильтре
	Выход питания (от руды), %	3,354	3,354
	Содержание Au в питании, г/т	3,50	3,50
	Содержание Au в хвостах, г/т	2,59	2,55
	Операционное извлечение Au, %	25,9	27,0
	Потери Au с хвостами гидрометаллургии, % (от руды)	9,8	9,6
Сквозное извлечение Au из смеси хвостов CIL на высокотемпературной стадии (от руды), %		3,4	3,6
Суммарное сквозное извлечение Au из (от руды), %		77,2	77,4

Гравитационно-флотационно-цианистая схема обеспечила прирост сквозного извлечения Au из руды в среднем на 11 % по сравнению с гравитационно-цианистой технологией и на 20 % по сравнению с технологией прямого цианирования. Внедряемая в настоящее время гравитационно-цианистая схема фактически является «плацдармом» для более глубокой модернизации ЗИФ с переводом ее на гравитационно-флотационно-цианистую схему, которая в настоящее время проходит стадию технико-экономического обоснования.

Заключение

В заключение следует отметить, что изучение столь упорных руд дало специалистам научно-исследовательского и проектного института «Иргиредмет» бесценный опыт, который сегодня позволяет решать аналогичные типовые и нетиповые задачи для промышленных предприятий. Институтом разработаны и отработаны новые современные технологические и методические приемы, которые МОГУТ быть использованы для вовлечения в переработку известных сырьевых объектов и новых видов упорного сорбционно-активного сырья.

Список литературы

1. Afenya P.M. Treatment of carbonaceous refractory gold ores // Minerals Engineering. 1991. Vol. 4. P. 1043–1055. DOI: 10.1016/0892-6875(91)90082-7
2. Лодейщиков В.В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд: в 2 т. Иркутск: ОАО Иргиредмет, 1999. Т. 2. 776 с.
3. Miller J., Wan R.Y., Díaz X. Chapter 49 – Preg-robbing gold ores // Gold ore processing. 2nd ed. 2016. P. 885–907. DOI: 10.1016/B978-0-444-63658-4.00049-9
4. The behaviour of carbonaceous matter in cyanide leaching of gold / H. Tan, D. Feng, G.C. Lukey, J.S.J. van Deventer // Hydrometallurgy. 2005. Vol. 78. P. 226–235. DOI: 10.1016/j.hydromet.2005.03.001
5. Research status of carbonaceous matter in carbonaceous gold ores and bio-oxidation pretreatment / H.-y. Yang, Q. Liu, X.-l. Song, J.-k. Dong // Trans Nonferrous Metals Soc. China. 2013. Vol. 23. P. 3405–3411. DOI: 10.1016/S1003-6326(13)62881-2
6. Assessment of options for economic processing of preg-robbing gold ores / R. Dunne, K. Buda, M. Hill et al. // Mineral Processing and Extractive Metallurgy. 2012. Vol. 121. P. 217–223. DOI: 10.1179/1743285512Y.0000000019
7. Dunne R., Staunton W.P., Afewu K. A historial review of the treatment of preg-robbing gold ores – what has worked and changed // World gold 2013, Brisbane, Australia. AusIMM, Burwood, 2013. P. 99–110.
8. Celastra S., Ramli S., Osman R.M. Meeting the challenge of Penjom Gold Mine's geology in the recovery of fine gold in carbonaceous ores // Bulletin of the Geological Society of Malaysia. 2015. Vol. 61. P. 1–9. URL: https://gsm.org.my/wp-content/uploads/gsm_file_2/702001-101681-PDF.pdf.
9. Bogudlova A., Voiloshnikov G. Carbonaceous matter removal from gold-bearing ores // IMPC 2014 – 27th International Mineral Processing Congress. Saniago, Chile, 2014. P. 129–137.
10. Удаление сорбционно-активных углеродистых веществ из упорных золотосульфидных руд и концентратов месторождения «Майское» / Т.Н. Александрова, В.Н. Цыплаков, А.О. Ромашев, Д.Н. Семенихин // Обогащение руд. 2015. № 4. С. 3–7.
11. Ковалев В.Н., Голиков В.В., Рылов Н.В. Анализ и выбор технологии переработки упорной золотосульфидной углеродсодержащей руды месторождения «Бакырчик» // Обогащение руд. 2017. № 2. С. 21–25.
12. К вопросу о депрессии углерода при флотации углистых золотосодержащих руд / А.И. Сосипаторов, Г.М. Панченко, А.Ю. Чикин и др. // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21, № 2. С. 155–162. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-2-155-162
13. ЗИФ «Павлик»: инновационные методы переработки. 07.10.2020. URL: <https://www.vnedra.ru/glavnaya-tema/zif-pavlik-innovacionnye-metody-pererabotki-11928/>
14. Chapter 24 – Roasting of gold ore in the circulating fluidized-bed technology / J. Hammerschmidt, J. Günther, B. Kerstiens, A. Charitos // Adams M.D. (Ed.). Gold ore processing. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2016. P. 393–409. DOI: 10.1016/B978-0-444-63658-4.00024-4
15. Ahmadiantehrani M., Hendrix J.L., Ramadorai G. Hypochlorite pre-treatment in heap leaching of a low grade carbonaceous ore // Miner. Metall. Proc. 1991. Vol. 8. P. 27–31.

16. Santiago R.C.C., Ladeira A.C.Q. Reduction of preg-robbing activity of carbonaceous gold ores with the utilization of surface blinding additives // Minerals Engineering. 2019. Vol. 131. P. 313–320. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.11.029
17. Adams M.D., Burger A.M. Characterization of carbonaceous preg-robbers and abraded carbon in gold residues // Minerals Engineering. 1998. Vol. 11, iss. 10. P. 919–927.
18. Kulpa C.F., Brierle J.A. Microbial deactivation of pre-robbing carbon in gold ore // Torma A.E., Wey J.E., Lakshmanan V.I. (Eds.). Biohydrometallurgical Technologies. The Minerals, Metals and Material Society. Warrendale, Pennsylvania, 1993. P. 427–435.
19. Оптимизация технологии обогащения бедной технологически упорной золото-углеродсодержащей руды / Е.И. Топычканова, Н.А. Дементьева, В.М. Муллов, А.Ю. Чикин // Вестник Забайкальского государственного университета. 2024. Т. 30, № 3. С. 89–100. DOI: 10.2109/2227-9245-2024-30-3-89-100
20. Binks M., Wemyss P. Fosterville gold mine heated leach process // Mineral Processing and Extractive Metallurgy. 2012. Vol. 12 (4). P. 224–227. DOI: 10.1179/1743285512Y.00000000023
21. Современное состояние технологий BIOX®, ASTER™ и HiTeCC / Я. ван Никерк, В. Оливьер, К. ван Буурен, Т. Ритасало // Золото и технологии. 2017. № 1 (35). URL: https://zolteh.ru/technology_equipment/sovremennoe-sostoyanie-tehnologij-biox-aster-i-hitecc/
22. Suzdal: Launch of HiTeCC Technology. URL: https://minedocs.com/20/Suzdal_Presentation_06282016.pdf.

References

1. Afenya P.M. Treatment of carbonaceous refractory gold ores. *Miner. Eng.* 1991;4:1043–1055. DOI: 10.1016/0892-6875(91)90082-7
2. Lodeyshchikov V.V. *Tekhnologiya izvlecheniya zolota i serebra iz upornykh rud: v 2 t.* [Technology of gold and silver extraction from refractory ores: in 2 volumes]. Irkutsk: JSC Irgiredmet; 1999. Vol. 2. 776 p. (In Russ.)
3. Miller J., Wan R.Y., Diaz X. Chapter 49 – Preg-robbing gold ores. In: *Gold ore processing*. 2nd ed. 2016. P. 885–907. DOI: 10.1016/B978-0-444-63658-4.00049-9
4. Tan H., Feng D., Lukey G.C., van Deventer J.S.J. The behaviour of carbonaceous matter in cyanide leaching of gold. *Hydrometallurgy*. 2005;78:226–235. DOI: 10.1016/j.hydromet.2005.03.001
5. Yang H.-y., Liu Q., Song X.-l., Dong J.-k. Research status of carbonaceous matter in carbonaceous gold ores and bio-oxidation pretreatment. *Trans Nonferrous Metals Soc. China*. 2013;23:3405–3411. DOI: 10.1016/S1003-6326(13)62881-2
6. Dunne R., Buda K., Hill M., Staunton W., Wardell-Johnson G., Tjandrawan V. Assessment of options for economic processing of preg-robbing gold ores. *Miner. Process Extr. M.* 2012;121:217–223. DOI: 10.1179/1743285512Y.0000000019
7. Dunne R., Staunton W.P., Afewu K. A historical review of the treatment of preg-robbing gold ores – what has worked and changed. In: *World gold 2013, Brisbane, Australia*. AusIMM, Burwood, Victoria, Australia; 2013. P. 99–110.
8. Celastra S., Ramli S., Osman R.M. Meeting the challenge of Penjom Gold Mine's geology in the recovery of fine gold in carbonaceous ores. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*. 2015;61:1–9. Available at: https://gsm.org.my/wp-content/uploads/gsm_file_2/702001-101681-PDF.pdf.
9. Bogudlova A., Voiloshnikov G. Carbonaceous matter removal from gold-bearing ores. In: *IMPC 2014 – 27th International Mineral Processing Congress*. Santiago, Chile; 2014. P. 129–137.
10. Aleksandrova T.N., Tsyplakov V.N., Romashev A.O., Semenikhin D.N. Removal of preg-robbing carbonaceous matter from refractory gold-sulfide ores and concentrates of the Mayskoye deposit. *Obogashchenie rud = Mineral processing journal*. 2015;(4):3–7. (In Russ.)
11. Kovalev V.N., Golikov V.V., Rylov N.V. Analysis and choice of technology for processing refractory gold-sulfide carbon-containing ore of the Bakyrchik deposit. *Obogashchenierud = Mineral processing journal*. 2017;(2):21–25. (In Russ.)
12. Sosipatorov A.I., Panchenko G.M., Chikin A.Y., Vysotin V.V., Vinokurova M.A., Koblov A.Y. To carbon depression under carbonaceous gold ore flotation. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017;21(21):155–162. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2017-2-155-162

13. ZIF “Pavlik”: *innovationnye metody pererabotki* [Pavlik Mill: Innovative Processing Methods]. 07.10.2020. (In Russ.) Available at: <https://www.vnedra.ru/glavnaya-tema/zif-pavlik-innovacionnye-metody-pererabotki-11928/>
14. Hammerschmidt J., Güntner J., Kerstiens B., Charitos A. Chapter 24 – Roasting of gold ore in the circulating fluidized-bed technology. In: Adams M.D. (Ed.). *Gold ore processing*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier; 2016. P. 393–409. DOI: 10.1016/B978-0-444-63658-4.00024-4
15. Ahmadiantehrani M., Hendrix J.L., Ramadorai G. Hypochlorite pre-treatment in heap leaching of a low grade carbonaceous ore. *Miner. Metall. Proc.* 1991;8:27–31.
16. Santiago R.C.C., Ladeira A.C.Q. Reduction of preg-robbing activity of carbonaceous gold ores with the utilization of surface blinding additives. *Miner. Eng.* 2019;131:313–320. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.11.029
17. Adams M.D., Burger A.M. Characterization of carbonaceous preg-robbers and abraded carbon in gold residues. *Miner. Eng.* 1998;11(10):919–927.
18. Kulpa C.F., Brierle J.A. Microbial deactivation of pre-robbing carbon in gold ore. In: Torma A.E., Wey J.E., Lakshmanan V.I. (Eds.). *Biohydrometallurgical Technologies. The Minerals, Metals and Material Society*. Warrendale, Pennsylvania; 1993. P. 427–435.
19. 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;30(3):89–100. (In Russ.) DOI: 10.2109/2227-9245-2024-30-3-89-100
20. Binks M., Wemyss P. Fosterville gold mine heated leach process. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2012;121(4):224–227. DOI: 10.1179/1743285512Y.0000000023
21. Van Nickerk Y., Olivier V., van Buuren K., Ritasalo T. Modern state of BIOX®, ASTER™ and HiTeCC technologies. *Gold and Technologies*. 2017;1(35). (In Russ.) Available at: https://zolteh.ru/technology_equipment/sovremennoe-sostoyanie-tehnologij-biox-aster-i-hitecc/
22. Suzdal: Launch of HiTeCC Technology. Available at: https://minedocs.com/20/Suzdal_Presentation_06282016.pdf.

Информация об авторах

Бывальцев Александр Владимирович, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории гидрометаллургии, АО «Иргиредмет», Иркутск, Россия; torrot_2008@mail.ru.

Винокурова Марина Александровна, старший научный сотрудник лаборатории обогащения руд, АО «Иргиредмет», Иркутск, Россия; vma@irgiredmet.ru.

Войлошников Григорий Иванович, д-р техн. наук, проф., заместитель генерального директора по научно-методической и инновационной деятельности, АО «Иргиредмет», Иркутск, Россия; greg@irgiredmet.ru.

Information about the authors

Alexander V. Byvaltsev, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher at the Laboratory of Hydrometallurgy, Irgiredmet, JSC, Irkutsk, Russia; torrot_2008@mail.ru.

Marina A. Vinokurova, Senior Researcher at the Ore Concentration Laboratory, Irgiredmet, JSC, Irkutsk, Russia; vma@irgiredmet.ru.

Grigory I. Voiloshnikov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Deputy General Director for Scientific, Methodological and Innovative Activities, Irgiredmet, JSC, Irkutsk, Russia; greg@irgiredmet.ru.

Статья поступила в редакцию 24.10.2024

The article was submitted 24.10.2024