



Научная статья

УДК 669.213.3

EDN: XVGAMM

DOI: 10.21285/1814-3520-2023-4-809-820

Сравнение способов повышения извлечения золота из золотосодержащих концентратов двойной упорности в технологии автоклавного окисления

Г.В. Петров^{1✉}, Д.В. Гордеев², В.Р. Бекирова³¹⁻³Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Россия

Резюме. Цель исследования заключалась в поиске наиболее универсальной и оптимальной технологии, которая позволит значительно минимизировать влияние органического углерода на извлечение золота из дважды упорного сырья. В работе были протестированы 3 дважды упорных золотосульфидных концентрата различных месторождений с содержанием золота от 23,5 до 40,9 г/т и с содержанием общего углерода в материале от 1,2 до 9,5% масс. Термическая обработка проводилась в трубчатой вращающейся печи, обеспечивающей постоянное поддержание заданной температуры в реакторе и скорости вращения. Измельчение исходного концентрата проводили в виде пульпы в планетарной мельнице Pulverisette 6 «Fritsch». Автоклавное окисление – в титановых автоклавах Premex и Büchi. Установлено, что наиболее эффективной является технология автоклавного окисления с добавкой вторичного окислителя, поскольку с ее помощью возможно добиться увеличения извлечения золота до 97%. Также технология высокотемпературного автоклавного окисления продемонстрировала высокие показатели, однако для их достижения необходимо значительное увеличение времени пребывания материала в автоклаве (до 120 мин) при повышенных температурах. Показано, что термическая обработка в целом позволяет добиться небольшого прироста в извлечении золота (до 4%), и ее можно рассматривать как дополнительный передел совместно с другой технологией из проанализированных в данной работе, но не в качестве самостоятельного технологического решения. Проведенные исследования выявили, что предварительная термическая обработка концентратов, поступающих на автоклавное окисление, показывает положительный эффект; высокотемпературное автоклавное окисление концентратов с различным содержанием углерода позволяет обеспечить высокое извлечение золота для высокоуглеродистых концентратов; использование вторичного окислителя (в виде азотной кислоты) также оказывает положительное влияние на извлечение золота. Высокая эффективность технологии применительно к концентратам с различным содержанием углеродистого вещества позволяет рекомендовать ее для проведения дальнейших исследований.

Ключевые слова: золото, упорные руды, preg-robbing, термическая обработка, азотная кислота, углерод

Для цитирования: Петров Г.В., Гордеев Д.В., Бекирова В.Р. Сравнение способов повышения извлечения золота из золотосодержащих концентратов двойной упорности в технологии автоклавного окисления // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 4. С. 809–820. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-809-820>. EDN: XVGAMM.

METALLURGY

Original article

Comparison of methods for enhancing gold recovery from double refractory concentrates using the technology of autoclave oxidation

Georgii V. Petrov^{1✉}, Daniil V. Gordeev², Veronika R. Bekirova³¹⁻³Saint Petersburg Mining University named after the Empress Catherine II, Saint Petersburg, Russia

Abstract. The study aims to investigate the most efficient method for significant minimization of the impact of organic carbon on gold recovery from double refractory raw materials. We tested three double refractory gold-sulfide concentrates from different deposits with the content of gold from 23.5 to 40.9 g/t and total carbon from 1.2 to 9.5 wt %. Thermal treatment was carried out in a tubular rotary furnace that provided permanent temperature setting and rotation speed in the

© Петров Г.В., Гордеев Д.В., Бекирова В.Р., 2023

reactor. The initial concentrate was grinded as pulp in a Fritsch planetary mono mill Pulverisette 6. Autoclave oxidation was performed in Premex and Büchi titanium autoclaves. The technology of autoclave oxidation with the addition of a secondary oxidizer was found to be the most efficient, since it can increase gold recovery up to 97%. Another technology – high-temperature autoclave oxidation – also proved high performance; however, a significant increase in the residence time of the material in the autoclave (up to 120 min) at elevated temperatures is required to achieve this performance. According to the results, thermal treatment in general can provide a small increase in gold recovery (up to 4%). Due to this, it can be used as an additional processing with other methods analyzed in this article rather than as a self-sufficient technological solution. The studies revealed that the preliminary thermal treatment of concentrates entering autoclave oxidation shows a positive effect; high-temperature autoclave oxidation of concentrates with different carbon content provides high gold recovery for high-carbon concentrates; the use of a secondary oxidizer (in the form of nitric acid) also benefits the gold recovery. The high efficiency of the technology for concentrates with different carbon content allows us to recommend it for further research.

Keywords: gold, refractory ores, preg-robbing, heat treatment, nitric acid, carbon

For citation: Petrov G.V., Gordeev D.V., Bekirova V.R. Comparison of methods for enhancing gold recovery from double refractory concentrates using the technology of autoclave oxidation. *iPolytech Journal*. 2023;27(4):809-820. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-809-820>. EDN: XVGAMM.

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость более эффективного извлечения золота из золотосодержащих руд двойной упорности [1–3] привела к разработке различных технологий обработки таких материалов [4–6].

Существуют две наиболее частые причины, приводящие к упорности золотосодержащих руд [7–10]. Во-первых, процесс извлечения золота может быть затруднен из-за связывания золота с сульфидными минералами, такими как пирит или арсенопирит [6–8]. Во-вторых, наличие органического углерода или углеродистых веществ может вызвать процесс preg-robbing [11–12], когда растворимые комплексы золота адсорбируются на поверхности углеродистого вещества [13–15], что снижает извлечение золота [16–18]. Тем не менее благодаря инновационным технологиям, научным исследованиям и современному оборудованию, эффективное извлечение золота становится возможным, даже при наличии сульфидов или органического углерода [19–21].

Извлечение золота из золотосодержащих руд двойной упорности является сложным процессом [22–24], который требует применения различных технологий и методов обработки [25–27]. В настоящее время наиболее перспективным и широко применяемым является автоклавное окисление [28–30].

Опыт современных автоклавных предприятий по переработке упорного сырья, содержащего золото, свидетельствует о том, что технология автоклавного окисления позволяет весьма эффективно перерабатывать не только упорные сульфидные концентраты, но и

золотосодержащее сырье двойной упорности [15, 19, 20]. Вместе с тем известно, что упорное золотосодержащее сырье разных месторождений может заметно отличаться свойствами сульфидов и углеродистого вещества [31–33]. Как правило, технологии современных автоклавных предприятий позволяют перерабатывать упорные золотосодержащие концентраты большинства месторождений с высоким извлечением золота [34–37], однако переработка высокоуглеродистого сырья некоторых месторождений затруднена, недостаточно эффективна или вообще исключена.

В мировой практике существуют различные способы повышения степени извлечения золота из дважды упорных концентратов в автоклавном процессе, направленные на разрушение или пассивацию органического углерода, входящего в исходные материалы [19, 20, 25]. К числу перспективных вариантов автоклавного окисления относятся следующие:

Высокотемпературное автоклавное окисление (ВТАО) предусматривает «тотальное» окисление концентратов при 230–250°C в течение 1,5–6,0 ч. При обозначенных условиях обеспечивается окисление не только сульфидов, но и углеродистого вещества, что практически полностью исключает хлоридный и цианидный preg-robbing⁴ [38, 39].

Термическая обработка (ТО) является дополнительной операцией и может применяться как до, так и после автоклавного окисления [40, 41]. Предварительная ТО (до АО) подразумевает термообработку углеродистого сырья при 300–400°C, которая позволяет снизить эффект хлоридного preg-robbing за счет снижения сорбционной активности

⁴Презентация ТЭО проекта АГМК-2. 2019. Режим доступа: <https://www.polymetalinternational.com/ru/investors-and-media/news/press-releases/11-02-2019/> (дата обращения: 18.06.2023).

органического углерода. ТО автоклавного остатка предполагает проведение процесса в окислительной среде и при более высоких температурах 500–550°C. За счет окислительной деструкции большей части органического углерода высвобождается золото, ассоциированное с углеродистым веществом. Основываясь на данных литературных источников, в процессе термической обработки (до 400°C) органический углерод не окисляется, а переходит в менее активную форму, благодаря чему снижается автоклавный preg-robbing. В рамках данного исследования проводилась термообработка исходных концентратов при температуре 350°C.

Применение «вторичного» окислителя в автоклавной технологии заключается в добавке специального реагента-окислителя в автоклав (в дополнение к кислороду) для активации и ускорения процесса окисления углеродистого вещества [42].

В рамках данной работы было проведено лабораторное тестирование дважды упорных золотосульфидных концентратов по вышеописанным технологиям с целью идентификации наиболее универсальной и оптимальной.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Термическая обработка проводилась в трубчатой вращающейся печи при заданной температуре в реакторе и скорости вращения. Навеска материала (примерно 105–110 г) загружалась в реактор печи, включался электродвигатель и нагрев. По достижении температуры 350°C в печи начинался отсчет времени, по истечении 30 мин нагрев выключался. После остывания печи вынимался кварцевый реактор, из которого выгружали материал для дальнейшей подготовки к автоклавному выщелачиванию. ТО проводили без подачи кислорода/воздуха в реактор.

Измельчение исходного концентрата проводили в виде пульпы с дистиллированной водой (Ж:Т = 1:1) в планетарной мельнице Pulverisette 6 «Fritsch» (Германия). Режим измельчения соответствовал умеренному (обозначение – Р3: диаметр шаров – 20 мм; загрузка шаров – 30 шт.; время измельчения – 5 мин, класс крупности –45 мкм – 85–90%) или сверхтонкому измельчению (обозначение – Р8: диаметр шаров – 10 мм; загрузка шаров – 180 шт.; время измельчения – 20 мин, класс крупности –45 мкм – 95–99%).

Пульпу после измельчения подвергали *кислотной обработке* (КО) или декарбонизации для разрушения карбонатов. Репульпацию материала проводили с использованием дистиллированной воды в термостойком стакане с непрерывным перемешиванием пульпы. Отношение Ж:Т = 4:1; температура – 60°C. После достижения рабочей температуры в пульпу подавали концентрированную серную кислоту. Продолжительность операции составляла 30 мин. Пульпу фильтровали на вакуум-фильтре, кек промывали на фильтре дистиллированной водой и переносили в автоклав.

Автоклавное окисление проводили в титановых автоклавах швейцарского производства:

- Premex емкостью 1,2 л;
- Büchi емкостью 1,1 л.

Оба автоклава снабжены электрическими нагревателями, внутренними водоохлаждаемыми змеевиками и контроллерами, позволяющим задавать и автоматически поддерживать температуру процесса (с точностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$) и скорость вращения перемешивающего устройства. Кислород в автоклав подавали из баллона через заглубленную трубку, используя систему автоматического поддержания давления и непрерывного измерения расхода подаваемого газа с помощью расходомера «Bronkhorst» (Нидерланды).

Автоклавное окисление вели при следующих параметрах: Т от 498 до 523 К (225–250°C) $P_{\text{O}_2} = 5 \cdot 10^5$ Па. В зависимости от режима окисления процесс либо заканчивали при прекращении расхода кислорода, либо продолжали переокисление материала от 30 до 120 мин при тех же температуре и давлении.

Материал подавали в автоклав в виде пульпы, которую готовили с использованием дистиллированной воды. Объем пульпы рассчитывали исходя из коэффициента заполнения автоклава 0,6. Отношение Ж:Т (массовое) получали в результате термохимических расчетов процесса автоклавного окисления с учетом оценки тепловых потерь промышленного автоклава.

По завершении процесса выщелачивания пульпу охлаждали до 95°C, сбрасывали избыточное давление и проводили кондиционирование.

Переокисление с добавкой вторичного окислителя. После того, как сульфиды были полностью окислены (в течение 10–30 мин в зависимости от типа материала), подача

Таблица 1. Характеристика исходных концентратов

Table 1. Characteristics of initial concentrates

Концентрат	Извлечение Au CIL, %	Содержание компонентов, %								Au/S ²⁻	Au/C _{орг}
		Au, г/т	C _{общ}	C _{граф}	C _{орг}	As	Fe	S _{общ}	S _{SO4}	ед.	ед.
K1	40,1	23,5	1,2	0,2	0,8	19,6	27,5	21,8	0,1	1,1	30
K2	63,8	40,9	3,6	0,5	2,9	1,9	19,5	19,4	0,1	2,1	14
K3	63,6	27,4	9,5	4,3	5,0	0,7	20,7	21,3	0,3	1,3	6

Обозначения к табл. 1:

C_{общ} – содержание общего углерода в концентрате;

C_{граф} – содержание углерода в концентрате в виде графита;

C_{орг} – содержание углерода в концентрате в органическом виде;

S_{общ} – содержание общей серы в концентрате;

S_{SO4} – содержание серы в концентрате в виде сульфатов.

кислорода прекращалась. Затем с помощью поршневого насоса «ChromTech» в реактор подавался раствор азотной кислоты. Для получения раствора азотной кислоты использовалась концентрированная азотная кислота (60%), которая смешивалась с дистиллированной водой в объемном соотношении 1:1. После подачи кислородная линия снова открывалась, а также открывалась линия сброса абгаза из автоклава. С этого момента начинался процесс переокисления материала.

Автоклавную пульпу подвергали кондиционированию при перемешивании и температуре 95°C в течение 120 мин с целью растворения основного сульфата железа и арсената железа. По окончании кондиционирования пульпу фильтровали на вакуум-фильтре, кек промывали на фильтре дистиллированной водой и направляли на цианирование. Пробу раствора и кек направляли на химический анализ.

Цианирование проводили в стеклянном реакторе при комнатной температуре и механическом перемешивании пульпы в течение 24 ч. Содержание твердого составляло 20% (Ж:Т = 4:1), pH пульпы 10,5–11,0, концентрация цианида в жидкой фазе пульпы в ходе опыта поддерживалась равной 2 г/дм³. В качестве базового сорбента использовалась смола Purogold S992, при необходимости применяли смолу AMBERSEP 91419 (MINIX) и активированный уголь HayCarb RPMC1004. Концентрация сорбента в пульпе составляла 5% (об.) от объема жидкой фазы (если не указано другое). По завершении цианирования сорбент отделяли на сите с размером ячейки 0,4 мм. Пульпу фильтровали, твердый остаток промывали, сушили и отправляли на пробирный и химический анализ.

На каждом концентрате были проведены следующие опыты:

Базовый опыт проводился в стандартных режимах АОВ: Т от 498 К (225°C) P_{O2} = 5·10⁵ Па. Подготовка материала включала измельчение и кислотную обработку. После АО пульпа подвергалась кондиционированию, кек АО далее цианировали.

Опыт с предварительной термообработкой исходного концентрата проводился по методике, описанной выше. После ТО материал подвергался АО по указанной выше методике.

Опыты по ВТАО проводили при увеличенном времени пребывания материала в автоклаве (время переокисления). Температуру увеличивали до 523 К (250°C), время переокисления от 30 до 120 мин.

Опыты с добавкой азотной кислоты в качестве вторичного окислителя проводили при расходе азотной кислоты 100 кг/т исходного концентрата и увеличенным временем окисления (переокисления) 30 мин.

ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

При проведении исследований были использованы 3 различных концентрата, химический состав которых представлен в табл. 1.

Представленные концентраты отличаются по многим характеристикам: количество цианируемого золота, содержание органического углерода, мышьяка, золота, а также таких показателей, как Au/S²⁻ и Au/C_{орг}. Технологические трудности с извлечением золота из концентратов двойной упорности существенно зависят от содержания органического углерода в перерабатываемом сырье.

Показатель Au/S²⁻ характеризует концентраты по «привлекательности» при их переработке за счет потенциальной прибыли от золота к расходам (кислород на окисление серы, нейтрализация серноокислых

растворов и т.д.). Соответственно, чем меньше показатель, тем выше себестоимость полученного золота. В промышленной практике переработки золотосодержащих руд и концентратов по автоклавной технологии отношение Au/S^{2-} , как правило, составляет 1,5 ед. и выше. Таким образом, концентраты с показателем $Au/S^{2-} < 1,5$ ед. можно охарактеризовать как низкоккачественные. При этом имеются и примеры проектов (Твин-Крикс, Лихир и Пуэбло-Вьехо), которые работают на сырье с отношением Au/S^{2-} 0,4–0,7 ед. [43].

Высокоуглеродистые концентраты, как правило, имеют высокий показатель Au/S^{2-} , однако для этих групп концентратов также характерны низкие отношения $Au/C_{орг}$. Последний показатель позволяет отнести концентраты к категории сырья с высоковываженной вторичной (углеродистой) упорностью к извлечению золота, которая связана с

феноменом preg-robbing драгметалла углеродистым веществом.

Проба концентрата К1 характеризуется средними содержаниями серы – 21,6% и содержанием золота – 23,5 г/т. Содержание органического углерода среднее – 1,03%.

Концентрат К2 отличается высоким содержанием органического углерода – 3,4%, средним содержанием серы – 19,3% и высоким содержанием золота – 41 г/т.

Концентрат К3 отличается очень высоким содержанием органического углерода – 9,45%, средним содержанием серы – 21,0% и средним содержанием золота – 27 г/т.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основные параметры и результаты экспериментов представлены в табл. 2.

Прямое сорбционное цианирование кон-

Таблица 2. Основные параметры и результаты экспериментов

Table 2. Main parameters and experimental results

Концентрат	ТО	АО	Добавка HNO_3 , кг/т	Т ок-е, мин	т переок-е, мин	У кек АО, %	Е Au, %	С Au ХЦ, г/т	С кек, %	ΔС, %
К1	-	498 К/5·10 ⁵ Па	0	26	0	74	80,0	5,9	1,2	14,3
	+	498 К/5·10 ⁵ Па	0	27	0	80	88,2	3,4	1,1	18,4
	-	523 К/5·10 ⁵ Па	0	11	30	85	98,0	0,6	0,5	36,8
	-	498К/5·10 ⁵ Па	100	25	30	76	98,0	0,6	0,2	86,0
К2	-	498 К/5·10 ⁵ Па	0	17	0	63	85,2	9,5	4,8	9,6
	+	498 К/5·10 ⁵ Па	0	16	0	61	81,2	12,6	5,2	4,6
	-	523 К/5·10 ⁵ Па	0	8	30	69	91,3	5,1	3,3	32,3
	-	523 К/5·10 ⁵ Па	0	7	60	67	96,0	2,4	1,3	39,1
	-	523 К/5·10 ⁵ Па	0	8	120	73	97,5	1,4	1,9	58,9
	-	498 К/5·10 ⁵ Па	100	17	30	63	98,6	0,9	0,5	84,6
К3	-	498 К/5·10 ⁵ Па	0	18	0	68	66,0	14,7	14,5	5,4
	+	498 К/5·10 ⁵ Па	0	16	0	60	70,5	13,3	14,3	7,9
	-	523 К/5·10 ⁵ Па	0	9	30	64	72,4	12,9	12,4	12,8
	-	498 К/5·10 ⁵ Па	100	18	30	68	72,8	9,7	5,4	61,3
	-	498 К/5·10 ⁵ Па	150	16	30	67	83,5	5,6	3,4	75,5

Обозначения в табл. 2:

ТО – термообработка (30 мин обработки при температуре 350°C);

АО – автоклавное окисление (температура/парциальное давление кислорода);

Добавка HNO_3 – добавка азотной кислоты в качестве вторичного окислителя, в кг кислоты на тонну исходного концентрата;

т ок-е, мин – продолжительность автоклавного окисления в минутах;

т переок-е, мин – продолжительность перекисления материала в минутах;

У кек АО, % – массовый выход автоклавного кекка;

Е Au, % – степень извлечения золота;

С Au ХЦ, г/т – содержание золота в хвостах цианирования;

С кек, % – концентрация органического углерода в кекке АО;

Δ С, % – степень окисления (удаления) органического углерода после АО.

концентрата К1 показывает, что доля свободно цианируемого золота в исходном концентрате составляет 40% (см. рис. 1). Проведение автоклавного окисления позволяет поднять извлечение золота до 80%, но имеет место preg-robbing. Проведение предварительной термической обработки положительно сказывается на показателях извлечения золота, оно возрастает до 88%, при этом степень окисления органического углерода возрастает незначительно с 14 до 18%.

Повышение температуры АО с дополнительным переокислением также оказало положительный эффект, извлечение поднялось до 98%, содержание золота в хвостах цианирования сократилось в 10 раз, степень окисления органического углерода возросла до 36%.

Добавка азотной кислоты в качестве вторичного окислителя также эффективна. Извлечение золота увеличивается до 98%, при этом степень окисления органического углерода возрастает до 86%, что говорит о высоких окислительных свойствах азотной кислоты.

Примечательно, что для данного материала достаточно удалить 36% органического углерода, дальнейшее его окисление нецелесообразно. Вполне вероятно, что расход в 100 кг/т азотной кислоты для данного материала избыточен и может быть снижен.

Концентрат К2 содержит 64% свободно цианируемого золота. Извлечение золота после автоклавного окисления составляет 85%.

Предварительная термическая обработка данного материала оказывает негативный эффект, снижая извлечение до 81%. Можно предположить, что в процессе ТО поверхность углеродистого вещества, наоборот, активировалась, создав большее количество сорбирующих пор. После этого в процессе цианирования наблюдался негативный эффект снижения извлечения золота за счет цианидного preg-robbing.

Применение технологии высокотемпературного автоклавного окисления позволяет повысить извлечение золота, однако для значительного прироста до 97% необходимо 120 мин переокисления материала в автоклаве. В реальном производстве такой режим окисления потребует значительного снижения производительности автоклава, что в итоге скажется на экономике предприятия.

Технология с добавкой азотной кислоты для данного материала является оптимальной, поскольку она позволяет резко повысить извлечение золота до 98% при 30-минутном переокислении, степень окисления углерода достигает 85%.

Концентрат К3 содержит 64% свободно цианируемого золота. Автоклавное окисление практически не увеличивает извлечение золота и составляет лишь 66%. Это может говорить о сильном влиянии процесса preg-robbing в автоклаве и сорбции золота на природное углеродистое вещество. ТО положительно сказывается на извлечении золота, увеличивая

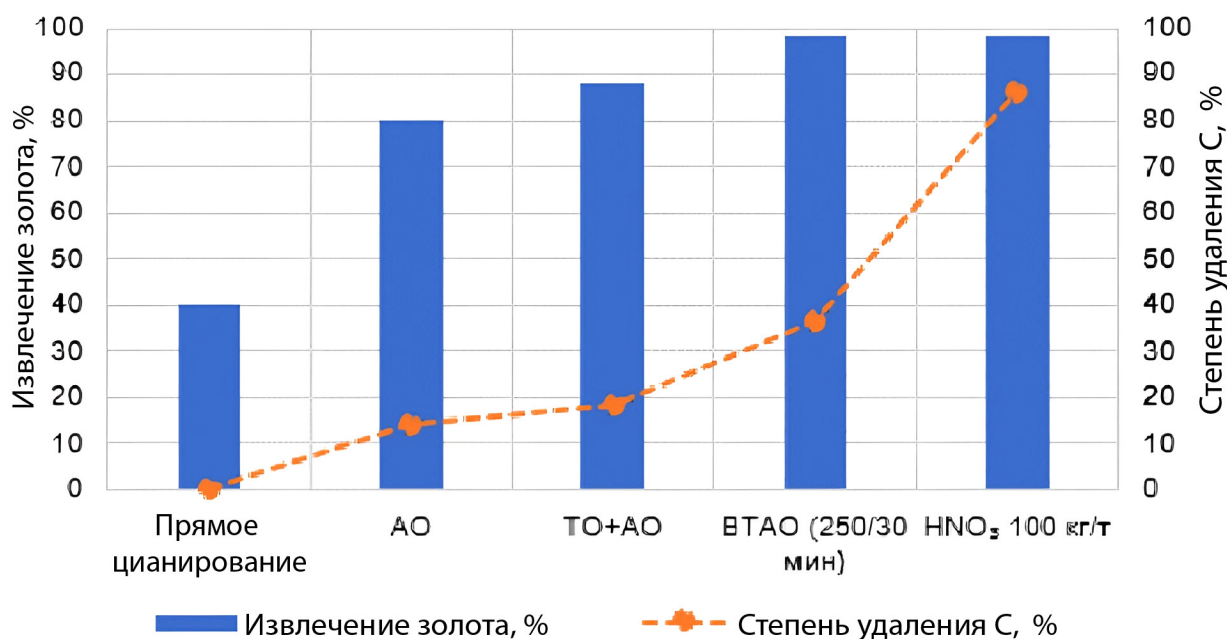


Рис. 1. Результаты экспериментов на концентрате К1

Fig. 1. Results of concentrate K1 experiments

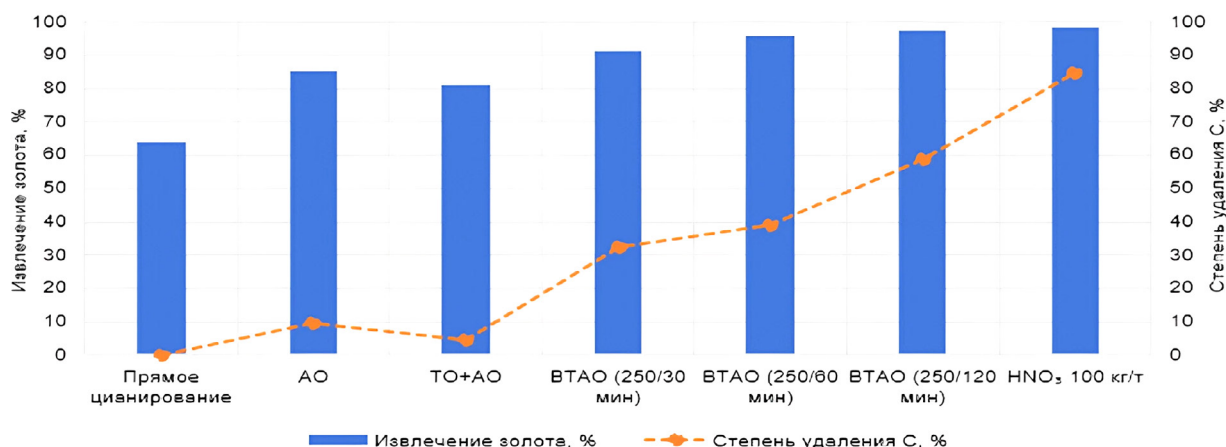


Рис. 2. Результаты экспериментов на концентрате K2
Fig. 2 Results of concentrate K2 experiments

его до 70%, при этом углерод практически не удаляется, степень его окисления возрастает с 5 до 7%.

ВТАО и добавка азотной кислоты оказывают одинаковый эффект, увеличивая извлечение золота до 72%. При этом степень удаления углерода в опыте с добавкой азотной кислоты заметно выше (61% против 13%). Скорее всего, углерод в данном концентрате представлен большим количеством форм, которые в процессе ТО и ВТАО

легко поддаются процессу дезактивации и на последующем АО и цианировании не сорбируют комплексы золота.

Также на данном материале был проведен дополнительный опыт с увеличенным расходом азотной кислоты, в результате которого извлечение золота удалось повысить до 83%. Вполне вероятно, что повышенный расход азотной кислоты окажет более значительный эффект. Такой же вывод можно сделать с увеличением времени перекисления для ВТАО.

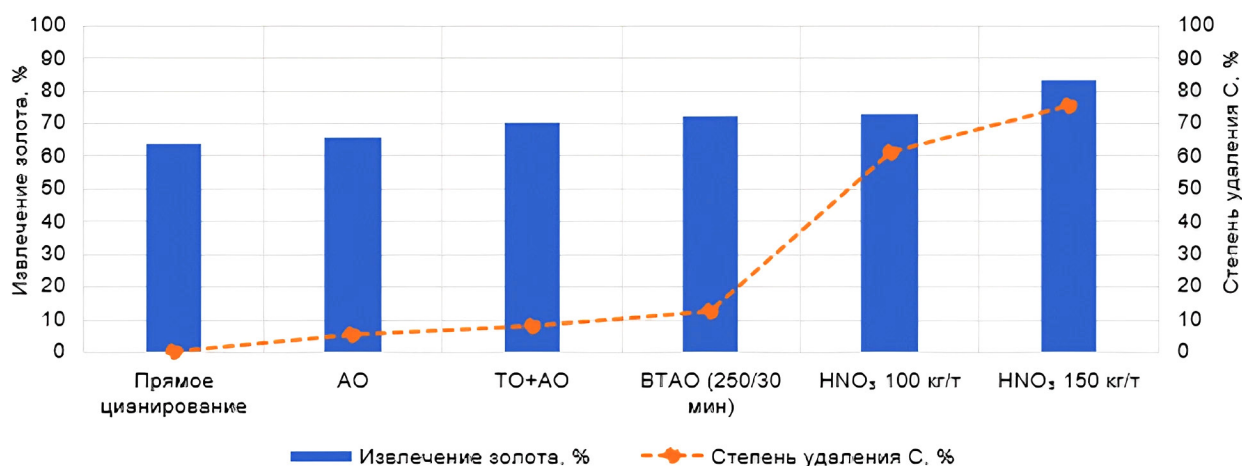


Рис. 3. Результаты экспериментов на концентрате K3
Fig. 3. Results of concentrate K3 experiments

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного тестирования различных технологий повышения степени извлечения золота в автоклавной технологии из дважды упорных золотосодержащих концентратов можно сделать следующие выводы:

Предварительная термическая обработка концентратов, поступающих на АО, показывает положительный эффект. К преимуществам

технологии можно отнести низкие капитальные затраты на организацию предварительной ТО, отсутствие выбросов соединений серы и мышьяка в процессе ТО (температура обработки ниже температуры диссоциации сульфидов) и возможность переработки мало- и среднеуглеродистых концентратов.

К недостаткам технологии относятся сравнительно невысокое повышение извлечения

золота, высокие операционные затраты, а также ее неуниверсальность, поскольку, как показали опыты, положительный эффект наблюдался не на всех материалах.

В целом термическую обработку можно рассматривать как дополнительный передел совместно с другой технологией из рассмотренных в данной работе, но не в качестве самостоятельного технологического решения.

Высокотемпературное автоклавное окисление концентратов с различным содержанием углерода позволяет обеспечить высокое извлечение золота для высокоуглеродистых концентратов.

По сравнению с традиционным, высокотемпературный метод автоклавного окисления потребует значительного увеличения объема и повышения прочностных характеристик автоклавной аппаратуры.

Использование вторичного окислителя (в виде азотной кислоты) при расходе 100 кг/т и продолжительности переокисления 30 мин на стадии автоклавного окисления повы-

сило извлечение золота, которое составило 97%. Однако для высокоуглеродистых концентратов с содержанием углерода более 9% необходим повышенный (более 150 кг/т) расход азотной кислоты.

Основной положительный эффект достигается за счет окисления сорбционно-активной части углеродистого вещества, что приводит к высвобождению золота и снижению способности угля к автоклавному preg-robbing.

К основным недостаткам технологии относятся следующие: высокая стоимость реагента (азотной кислоты), увеличение экологической нагрузки из-за применения реагента, возможное коррозионное влияние на конструкционные материалы, а также отсутствие промышленного опыта использования технологии в аналогичных условиях. Однако чрезвычайно высокая эффективность технологии применительно к концентратам с различным содержанием углеродистого вещества позволяет рекомендовать ее для проведения дальнейших исследований.

Список источников

1. Захаров Б.А., Меретуков М.А. Золото: упорные руды. М.: Руда и металлы, 2013. 452 с.
2. Васильева А.А., Бодуэн А.Я. Минералогические особенности и способы переработки медных цинксо-державших концентратов (Учалинский горно-обогатительный комбинат) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 3. С. 61–72. <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/3/3956>.
3. Васильева А.А., Бодуэн А.Я., Васильев Р.Е. Анализ возможности применения гидрометаллургических методов с целью улучшения переработки медных концентратов // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 2. С. 320–335. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-320-335>.
4. Бодуэн А.Я., Поперечникова О.Ю., Залесов М.В., Григорьева В.А. Экспериментальное опробование технологий переработки упорного золотосодержащего сырья // Цветные металлы. 2022. № 7. С. 24–33. <https://doi.org/10.17580/tsm.2022.07.02>.
5. Меретуков М.А., Рудаков В.В., Злобин М.Н. Геотехнологические исследования для извлечения золота из минерального и техногенного сырья. М.: Горная книга, 2011. 438 р.
6. Федотов П.К., Сенченко А.Е., Федотов К.В., Бурдонов А.Е. Исследования обогатимости сульфидных и окисленных руд золоторудных месторождений Алданского щита // Записки Горного института. 2020. Т. 242. С. 218. <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.2.218>.
7. Aleksandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A., Romashev A., Aburova V., Prokhorova E. Extraction of low-dimensional structures of noble and rare metals from carbonaceous ores using low-temperature and energy impacts at succeeding stages of raw material transformation // Minerals. 2023. Vol. 13. Iss. 1. P. 84. <https://doi.org/10.3390/min13010084>.
8. Chrysosoulis S.L., McMullen J. Mineralogical investigation of gold ores // Developments in Mineral Processing. 2005. Vol. 15. P. 21–72. [https://doi.org/10.1016/S0167-4528\(05\)15002-9](https://doi.org/10.1016/S0167-4528(05)15002-9).
9. Артемьев Д.С., Крымский Р.Ш., Беяцкий Б.В., Ашихмин Д.С. Возраст оруденения Майского золоторудного месторождения (Центральная Чукотка): результаты Re-Os изотопного датирования. Записки Горного института. 2020. Т. 243. С. 266–278. <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.3.266>.
10. Marsden J.O., House C.I. The chemistry of gold extraction // Pyrometallurgical Oxidation. Littleton, Colorado: SME, 2006. Vol. 39. Iss. 3. P. 138. <https://doi.org/10.1007/BF03215543>.
11. Матвеев А.И., Лебедев И.Ф., Винокуров В.Р., Львов Е.С. Научно-экспериментальные основы сухого обогащения руд полезных ископаемых // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 613–622. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.90>.
12. Жмурова В.В., Немчинова Н.В. Опыт комплексного использования золотосодержащего сырья при производстве драгоценных металлов // Записки Горного института. 2018. Т. 233. С. 506–511. <https://doi.org/10.31897/pmi.2018.5.506>.

13. Afenya P.M. Treatment of carbonaceous refractory gold ores // *Minerals Engineering*. 1991. Vol. 4. Iss. 7-11. P. 1043–1055. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(91\)90082-7](https://doi.org/10.1016/0892-6875(91)90082-7).
14. Miller J.D., Wan R.-Y., Díaz X. Preg-robbing gold ores // *Gold Ore Processing: Project Development and Operations* / ed. M.D. Adams. Singapore: Ltd, 2016. Chapt. 49. P. 885–907. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00049-9>.
15. Воробьев-Десятовский Н.В., Епифанов А.В. Автоклавное окисление дважды упорных золотосодержащих руд. Проблемы и пути решения // *Минерально-сырьевой комплекс России – новые рубежи и вызовы: 10 Горнопромышленный форум*. 2014. Режим доступа: <https://studylib.ru/doc/2335298/avtoklavnoe-okislenie-dvazhdy-upornyh-zolotosoderzhashih-rud?ysclid=lopog3go4l424674494> (дата обращения: 15.06.2023).
16. Selley R.C., Sonnenberg S.A. Elements of petroleum geology // *Elements of Petroleum Geology*. 2023. 622 p. <https://doi.org/10.1016/C2019-0-04461-5>.
17. Selley R.C. Sedimentary rocks: mineralogy and classification // *Encyclopedia of Geology*. 2004. P. 25–37. <https://doi.org/10.1016/B0-12-369396-9/00304-X>.
18. Van Vuuren C.P.J., Snyman C.P., Boshoff A.J. Gold losses from cyanide solutions part II: the influence of the carbonaceous materials present in the shale material // *Minerals Engineering*. 2000. Vol. 13. Iss. 10-11. P. 1177–1181. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(00\)00100-X](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(00)00100-X).
19. Гордеев Д.В., Петров Г.В., Хасанов А.В., Северинова О.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. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/1/3228>.
20. Naboychenko S.S., Shneerson Ya.M., Kalashnikova M.I., Chugaev L.V. Autoclave hydrometallurgy of non-ferrous metals. Yekaterinburg: GOU VPO USTU-UI, 2009. Vol. 2. 939 p.
21. Aleksandrova T.N., Heide G., Afanasova A.V. Assessment of refractory gold-bearing ores based of interpretation of thermal analysis data // *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 235. Iss. 1. P. 30–37. <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.1.30>.
22. Ракишев К. «Золото» за упорство // *Интерфакс*. 2018. Режим доступа: <https://www.interfax.ru/business/643474> (дата обращения: 15.06.2023).
23. Zalesov M.V., Grigoreva V.A., Trubilov V.S., Boduen A.Ya. Designing of engineering solutions to enhance efficiency of high-copper gold-bearing ore processing // *Горная промышленность*. 2021. № 5. С. 51–56. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-5-51-56>.
24. Simmons G.L., Baughman D.R., Gathje J.C., Oberg K.C. Pressure oxidation problems and solutions: treating carbonaceous gold ores containing trace amounts of chlorine (halogens) // *Mining Engineering*. 1998. Vol. 50. Iss. 1. P. 69–73.
25. Шнеерсон Я.М., Чугаев Л.В. Особенности автоклавного окисления сульфидных золотосодержащих концентратов двойной упорности // *Цветные металлы*. 2019. № 8. С. 55–66. <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.08.06>.
26. Zaytsev P., Fomenko I., Shneerson Ya., Polezhaev S., Pleshkov M. Special aspects of continuous pressure oxidation of double refractory concentrates // *Conference: ALTA*. 2014. P. 226–234.
27. Helm M., Vaughan J., Staunton, W.P., Avraamides J. An investigation of the carbonaceous component of preg-robbing gold ores // *World Gold Conference. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2009.
28. Edahbi M., Merillod-Blondin R., Plante B., Benzaazoua M. CIL gold loss characterization within oxidized leach tails: creating a synergistic approach between mineralogical characterization, diagnostic leach tests, and preg-robbing tests // *Minerals*. 2019. Vol. 9. Iss. 9. P. 557. <https://doi.org/10.3390/min9090557>.
29. Simmons G.L. Pressure oxidation process development for treating carbonaceous ores at Twin Creeks // *Randol Gold Forum. Golden*, 1996. P. 199–208.
30. Chan T., Collins M., Dennett J., Stiksm J., Ji J., Kalanchey R., Berezowsky R. Pilot plant pressure oxidation of refractory gold-silver concentrate from Eldorado Gold Corporation's Certej Project in Romania // *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2015. Vol. 54. Iss. 3. P. 252–260. <https://doi.org/10.1179/1879139515Y.0000000018>.
31. Aleksandrova T.N., Heide G., Afanasova A.V. Assessment of refractory gold-bearing ores based of interpretation of thermal analysis data // *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 235. Iss. 1. P. 30–37. <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.1.30>.
32. Rusalev R.E., Rogozhnikov D.A., Naboychenko S.S. Nitric acid treatment of Olympiada deposit refractory gold-bearing concentrate // *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 946. P. 541–546. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.541>. EDN: HARCAW.
33. Anderson C.G. Applications of NSC pressure leaching // *Pressure Hydrometallurgy*. Montreal: The Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2004. P. 855–886.
34. Ackerman J.B., Anderson C.G., Nordwick S.M., Krys L.E. Hydrometallurgy at the Sunshine metallurgical complex // *Proceedings of the Fourth International Symposium on Hydrometallurgy*. Littleton, Colorado, SME, 1993.
35. Anderson C.G. The application and economics of industrial NSC pressure leaching to copper ores and concentrates. COBRE 2003. Santiago, 2003.
36. Anderson C.G. Nitrogen species catalyzed pressure leaching of copper ores and concentrates // *ALTA Copper 2000*. Adelaide, 2000.
37. Anderson C.G., Rosenberg E. Single step separation and recovery of palladium using nitrogen species catalyzed pressure leaching and silica polyamine composites // *Hydrometallurgy: Conference*. Vancouver, 2003.
38. Фоменко И.В., Плешков М.А., Лях С.И., Лаевский С.И. Высокотемпературное автоклавное окисление сырья двой-

ной упорности // Цветные металлы. 2020. № 9. С. 110–116. <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.09.11>.

39. Лаевский С.И., Лях С.И., Маркелов А.В. Высокотемпературное автоклавное окисление золотосодержащего сырья двойной упорности // Металлургия цветных, редких и благородных металлов: сб. тез. докл. XIV Международной конф., посвящ. 40-летию Института химии и химической технологии Сибирского отделения РАН (г. Красноярск, 6–9 сентября 2021 г.). Красноярск: Научно-инновационный центр, 2021. С. 54–56. EDN: RTKVTE.

40. Полежаев С.Ю., Черемисина О.В. Комплексная технология переработки золотосодержащих концентратов: автоклавное выщелачивание с последующим обжигом // Известия вузов. Цветная металлургия. 2015. № 3. С. 34–39. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2015-3-34-39>.

41. Пат. № 2636775, Российская Федерация, С2. С22В 11/00, С22В 3/06. Способ переработки золотосодержащих концентратов двойной упорности / Л.В. Чугаев, Я.М. Шнеерсон, М.А. Плешков, И.В. Фоменко, А.В. Маркелов. Заявл. 20.02.2016; опубл. 28.11.2017.

42. Пат. № 2732819, Российская Федерация, С1, С22В 11/00, С22В 3/00. Способ автоклавной переработки углистых золотосодержащих концентратов с использованием дополнительного реагента-окислителя / Д.В. Гордеев, И.В. Фоменко, Л.В. Чугаев, Я.М. Шнеерсон; Заявл. 01.11.2019; опубл. 22.09.2020.

43. Набойченко С.С., Шнеерсон Я.М., Калашникова М.И., Чугаев Л.В. Автоклавная гидрометаллургия цветных металлов. 2009. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2009. Т. 2. 939 с.

References

1. Zakharov B.A., Meretukov M.A. *Gold: refractory ores*. Moscow: Ruda i metally; 2013, 452 p. (In Russ.).
2. Vasileva A.A., Boduen A.Ya. Mineralogical features and processing of copper zinc-containing concentrates (Uchalinsky Mining and Processing Plant). *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2023;334(3):61-72. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/3/3956>.
3. Vasileva A.A., Boduen A.Ya., Vasiliev R.E. The feasibility of hydrometallurgical methods for enhancing the processing of copper concentrates. *iPolytech Journal*. 2022;26(2):320-335. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-320-335>.
4. Boduen A.Ya., Poperechnikova O.Yu., Zalesov M.V., Grigoryeva V. Experimental testing of technologies for processing refractory gold-bearing raw materials. *Tsvetnye Metally*. 2022;7:24-33. <https://doi.org/10.17580/tsm.2022.07.02>.
5. Meretukov M.A., Rudakov V.V., Zlobin M.N. *Geotechnological research for gold extraction and recovery from mineral and technogenic raw materials*. Moscow: Gornaya kniga; 2011, 438 p. (In Russ.).
6. Fedotov P.K., Senchenko A.E., Fedotov K.V., Burdonov A.E. Studies of enrichment of sulfide and oxidized ores of gold deposits of the Aldan shield. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2020;242:218. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.2.218>.
7. Aleksandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A., Romashev A., Aburova V., Prokhorova E. Extraction of low-dimensional structures of noble and rare metals from carbonaceous ores using low-temperature and energy impacts at succeeding stages of raw material transformation. *Minerals*. 2023;13(1):84. <https://doi.org/10.3390/min13010084>.
8. Chrysosoulis S.L., McMullen J. Mineralogical investigation of gold ores. In: *Developments in Mineral Processing*. 2005;15: 21-72. [https://doi.org/10.1016/S0167-4528\(05\)15002-9](https://doi.org/10.1016/S0167-4528(05)15002-9).
9. Artemiev D.S., Krymsky R.S., Belyatsky B.V., Ashikhmin D.S. Mineralization age of Mayskoe gold ore deposit (Central Chukotka): Re-Os isotopic dating results. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2020;266-278. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.3.266>.
10. Marsden J.O., House C.I. The chemistry of gold extraction. In: *Pyrometallurgical Oxidation*. Littleton, Colorado: SME; 2006, vol. 39, iss. 3, p. 138. <https://doi.org/10.1007/BF03215543>.
11. Matveev A.I., Lebedev I.F., Vinokurov V.R., L'vov E.S. Scientific and experimental foundations of mineral ore dry beneficiation. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2022;256:613-622. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/pmi.2022.90>.
12. Zhmurova V.V., Nemchinova N.V. Experience of integrated use of gold-bearing raw material in the production of precious metals. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2018;233:506. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/pmi.2018.5.506>.
13. Afenya P.M. Treatment of carbonaceous refractory gold ores. *Minerals Engineering*. 1991;4(7-11):1043-1055. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(91\)90082-7](https://doi.org/10.1016/0892-6875(91)90082-7).
14. Miller J.D., Wan R.-Y., Díaz X. Preg-robbing gold ores. In: Adams M.D. (ed.). *Gold Ore Processing: Project Development and Operations*. Singapore: Ltd; 2016, chapt. 49, p. 885-907. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00049-9>.
15. Vorobiev-Desyatovskij N.V., Epifanov A.V. Pressure oxidation of double refractory gold ores. Problems and solutions. *Mineral'no-syr'evoy kompleks Rossii – novye rubezhi i vyzovy: 10 Gornopromyshlennyj forum*. 2014. Available from: <https://studylib.ru/doc/2335298/avtoklavnoe-okislenie-dvazhdy-upornyh-zolotosoderzhashhih-rud?ysclid=lopog-3go4l424674494> [Accessed 15th June 2023]. (In Russ.).
16. Selley R.C., Sonnenberg S.A. Elements of petroleum geology. In: *Elements of Petroleum Geology*. 2023, 622 p. <https://doi.org/10.1016/C2019-0-04461-5>.

17. Selley R.C. Sedimentary rocks: mineralogy and classification. In: *Encyclopedia of Geology*. 2004;25-37. <https://doi.org/10.1016/B0-12-369396-9/00304-X>.
18. Van Vuuren C.P.J., Snyman C.P., Boshoff A.J. Gold losses from cyanide solutions part II: the influence of the carbonaceous materials present in the shale material. *Minerals Engineering*. 2000;13(10-11):1177-1181. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(00\)00100-X](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(00)00100-X).
19. Gordeev D.V., Petrov G.V., Hasanov A.V., Severinova O.V. Review of modern processing technologies of refractory gold ores and concentrates using nitric acid. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov = Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022;333(1):214-224. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/1/3228>.
20. Naboychenko S.S., Shneerson Ya.M., Kalashnikova M.I., Chugaev L.V. *Autoclave hydrometallurgy of non-ferrous metals*. Yekaterinburg: GOU VPO USTU-UPI; 2009, vol. 2, 939 p.
21. Aleksandrova T.N., Heide G., Afanasova A.V. Assessment of refractory gold-bearing ores based of interpretation of thermal analysis data. *Journal of Mining Institute*. 2019;235(1):30-37. <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.1.30>.
22. Rakishev K. "Gold" for being refractory. *Interfaks*. 2018. Available from: <https://www.interfax.ru/business/643474> [Accessed 15th June 2023]. (In Russ.).
23. Zalesov M.V., Grigoreva V.A., Trubilov V.S., Boduen A.Ya. Designing of engineering solutions to enhance efficiency of high-copper gold-bearing ore processing. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2021;(5):51-56. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-5-51-56>.
24. Simmons G.L., Baughman D.R., Gathje J.C., Oberg K.C. Pressure oxidation problems and solutions: treating carbonaceous gold ores containing trace amounts of chlorine (halogens). *Mining Engineering*. 1998;50(1):69-73.
25. Shneerson Y.M., Chugaev L.V. Pressure oxidation of double refractory gold bearing sulphide concentrates. *Tsvetnye Metally*. 2019;8:55-66. <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.08.06>.
26. Zaytsev P., Fomenko I., Shneerson Ya., Polezhaev S., Pleshkov M. Special aspects of continuous pressure oxidation of double refractory concentrates. In: *Conference: ALTA*. 2014;226-234.
27. Helm M., Vaughan J., Staunton, W.P., Avraamides J. An investigation of the carbonaceous component of preg-robbing gold ores. *World Gold Conference. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2009.
28. Edahbi M., Mermillod-Blondin R., Plante B., Benzaazoua M. CIL gold loss characterization within oxidized leach tails: creating a synergistic approach between mineralogical characterization, diagnostic leach tests, and preg-robbing tests. *Minerals*. 2019;9(9):557. <https://doi.org/10.3390/min9090557>.
29. Simmons G.L. Pressure oxidation process development for treating carbonaceous ores at Twin Creeks. In: *Randol Gold Forum*. Golden, 1996;199-208.
30. Chan T., Collins M., Dennett J., Stikma J., Ji J., Kalanchey R., Berezowsky R. Pilot plant pressure oxidation of refractory gold-silver concentrate from Eldorado Gold Corporation's Certej Project in Romania. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2015;54(3):252-260. <https://doi.org/10.1179/1879139515Y.0000000018>.
31. Aleksandrova T.N., Heide G., Afanasova A.V. Assessment of refractory gold-bearing ores based of interpretation of thermal analysis data. *Journal of Mining Institute*. 2019;235(1):30-37. <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.1.30>.
32. Rusalev R.E., Rogozhnikov D.A., Naboychenko S.S. Nitric acid treatment of Olympiada deposit refractory gold-bearing concentrate. *Materials Science Forum*. 2019;946:541-546. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.541>. EDN: HARCAW.
33. Anderson C.G. Applications of NSC pressure leaching. In: *Pressure Hydrometallurgy*. Montreal: The Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum; 2004, p. 855-886.
34. Ackerman J.B., Anderson C.G., Nordwick S.M., Kryz L.E. Hydrometallurgy at the Sunshine metallurgical complex. In: *Proceedings of the Fourth International Symposium on Hydrometallurgy*. Littleton, Colorado, SME, 1993.
35. Anderson C.G. The application and economics of industrial NSC pressure leaching to copper ores and concentrates. In: *COBRE 2003*. Santiago; 2003.
36. Anderson C.G. Nitrogen species catalyzed pressure leaching of copper ores and concentrates. In: *ALTA Copper 2000*. Adelaide, 2000.
37. Anderson C.G., Rosenberg E. Single step separation and recovery of palladium using nitrogen species catalyzed pressure leaching and silica polyamine composites. In: *Hydrometallurgy: Conference*. Vancouver; 2003.
38. Fomenko I.V., Pleshkov M.A., Lyakh S.I., Laevskiy S.I. High-temperature pressure oxidation of double-refractory raw materials. *Tsvetnye Metally*. 2020;9:110-116. <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.09.11>.
39. Laevskiy S.I., Lyakh S.I., Markelov A.V. High temperature pressure oxidation of double refractory gold materials. In: *Metallurgiya cvetnykh, redkih i blagorodnykh metallov: sbornik tezisov dokladov XIV mezhdunarodnoj konferencii, posvyashchennoj 40-letiyu Instituta himii i himicheskoy tekhnologii Sibirskogo otdeleniya RAN = Metallurgy of non-ferrous, rare and noble metals: collected abstracts of the reports of the 14th International Conference dedicated to the 40th anniversary of the Institute of Chemistry and Chemical Technology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences*. 6–9 September 2021, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk: Nauchno-innovacionnyj centr; 2021, p. 54-56. (In Russ.). EDN: RTKBTE.
40. Polezhaev S.Yu., Cheremisina O.V. Complex processing technology of gold-containing concentrates: autoclave leaching with subsequent roasting. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2015;(3):34-39.

(In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2015-3-34-39>.

41. Chugaev L.V., Shneerson Ya.M., Pleshkov M.A., Fomenko I.V., Markelov A.V. *Processing method for double refractory gold-containing concentrates*. Patent RF, no. 2636775; 2017. (In Russ.).

42. Gordeev D.V., Fomenko I.V., Chugaev L.V., Shneerson Ya.M. *Method of pressure processing of carbonaceous gold-containing concentrates using an additional oxidizing agent*. Patent RF, no. 2732819, 2020. (In Russ.).

43. Nabojchenko S.S., Shneerson Ya.M., Kalashnikova M.I., Chugaev L.V. *Pressure hydrometallurgy of non-ferrous metals*. Ekaterinburg: Ukhta State Technical University; 2009, vol. 2, 939 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Петров Георгий Валентинович,

д.т.н., профессор,
профессор кафедры металлургии,
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2, Россия
✉ petroffg@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2382-5235>

Гордеев Даниил Валерьевич,

аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2, Россия
danya.gordeev.2014@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1381-7808>

Бекирова Вероника Руслановна,

магистрант,
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2, Россия
lalalen00@inbox.ru
<https://orcid.org/0009-0006-8938-1744>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 02.10.2023 г.;
одобрена после рецензирования 30.10.2023 г.;
принята к публикации 06.11.2023 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Georgii V. Petrov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Metallurgy Department,
Saint Petersburg Mining University named
after the Empress Catherine II,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia
✉ petroffg@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2382-5235>

Daniil V. Gordeev,

Postgraduate Student,
Saint Petersburg Mining University named
after the Empress Catherine II,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia
danya.gordeev.2014@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1381-7808>

Veronika R. Bekirova,

Master's Degree Student,
Saint Petersburg Mining University named
after the Empress Catherine II,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia
lalalen00@inbox.ru
<https://orcid.org/0009-0006-8938-1744>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 02.10.2023;
approved after reviewing 30.10.2023;
accepted for publication 06.11.2023.