

УДК 669.213.6

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-3-66-73>

Научная статья

Research article



Комбинированная схема кондиционирования оборотных цианистых растворов

А.М. Самофеев^{1,2}, В.Г. Лобанов¹, Ф.М. Набиуллин², А.В. Третьяков²

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

² ООО «Березовский рудник»
Россия, 623700, Свердловская обл., г. Березовский, ул. Березовский тракт, 1

✉ Александр Михайлович Самофеев (alexander.samofeev@gmail.com)

Аннотация: Ввиду специфики работы гидрометаллургических переделов, где применяются цианистые растворы, происходит периодическое изменение состава выщелачивающего раствора, получившее в литературе название «устоляемость». Это в негативном ключе влияет на скорость процесса извлечения и цементации золота, а следовательно, в целом на эффективность технологии цианистого выщелачивания. Одним из наиболее важных маркеров, определяющих «устоляемость» раствора, является медь. В работе исследовалась возможность применения комбинированной схемы очистки оборотных цианистых растворов с высоким содержанием примесей меди (1196 мг/дм³), железа (111 мг/дм³), мышьяка (19 мг/дм³) и цианида натрия (0,94 г/дм³). Разработана 2-этапная технология (обратный осмос + химическое осаждение) для сокращения объемов обрабатываемых растворов и удаления примесей. На первом этапе раствор разделяли на обратноосмотической установке с мембранами LP22-8040, получая пермеат и концентрат в пропорции 1 : 1. Пермеат (12 мг/дм³ Cu и 0,01 мг/дм³ Fe, pH = 11,13) возвращали в технологический цикл. А на втором этапе концентрат, содержащий 99 % исходных примесей, доочищали дозированным введением раствора CuSO₄ (70 г/дм³ Cu) с интервалом доз 1–11 см³ при перемешивании (500 об/мин, 10 мин). Результаты показали, что оптимальная доза CuSO₄ (11 см³) обеспечивает удаление более 86 % Cu из исходного раствора, а также 100 % Fe и более 96 % As. Полученный в процессе осадок на 68,3 % состоит из меди, а основными компонентами являются CuCN и Cu(OH)₂.

Ключевые слова: золото, цианистое выщелачивание, Меррилл-Кроу, цементация, обратный осмос, медь, мышьяк, пассивация поверхности.

Для цитирования: Самофеев А.М., Лобанов В.Г., Набиуллин Ф.М., Третьяков А.В. Комбинированная схема кондиционирования оборотных цианистых растворов. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2025;31(3):66–73.

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-3-66-73>

Combined scheme for conditioning circulating cyanide solutions

A.M. Samofeev^{1,2}, V.G. Lobanov¹, F.M. Nabiullin², A.V. Tretyakov²

¹ Ural Federal University n.a. the First President of Russia B.N. Yeltsin
19 Mira Str., Ekaterinburg 620002, Russia

² LLC “Berezhovskiy Rudnik”
1 Berezhovskiy Tract, Sverdlovsk Reg., Berezhovskiy 623700, Russia

✉ Alexander M. Samofeev (alexander.samofeev@gmail.com)

Abstract: Due to the specific features of hydrometallurgical processing, where cyanide solutions are used, the composition of the leaching solution undergoes periodic changes referred to in the literature as “fatigue.” This adversely affects the rate of gold recovery and cementation, and therefore the overall efficiency of cyanide leaching technology. One of the most important markers determining the “fatigue” of the solution

is copper. This study examined the possibility of applying a combined scheme for the purification of circulating cyanide solutions with high concentrations of copper (1196 mg/dm^3), iron (111 mg/dm^3), arsenic (19 mg/dm^3), and sodium cyanide (0.94 g/dm^3). A two-stage technology (reverse osmosis + chemical precipitation) was developed for the reduction of treated solution volumes and the removal of impurities. At the first stage, the solution was separated in a reverse osmosis unit equipped with LP22-8040 membranes, producing permeate and concentrate in a 1 : 1 ratio. The permeate ($12 \text{ mg/dm}^3 \text{ Cu}$ and $0.01 \text{ mg/dm}^3 \text{ Fe}$, $\text{pH} = 11.13$) was returned to the process cycle. At the second stage, the concentrate, which contained 99 % of the initial impurities, was further purified by the stepwise addition of a CuSO_4 solution ($70 \text{ g/dm}^3 \text{ Cu}$) in $1\text{--}11 \text{ cm}^3$ doses under stirring (500 rpm, 10 min). The results showed that the optimal CuSO_4 dose (11 cm^3) provided removal of more than 86 % of Cu from the initial solution, as well as 100 % of Fe and more than 96 % of As. The precipitate obtained in the process consisted of 68.3 % copper, with CuCN and Cu(OH)_2 as the main components.

Keywords: gold, cyanide leaching, Merrill-Crowe, cementation, reverse osmosis, copper, arsenic, surface passivation.

For citation: Samofeev A.M., Lobanov V.G., Nabiullin F.M., Tretyakov A.V. Combined scheme for conditioning circulating cyanide solutions. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2025;31(3):66–73. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-3-66-73>

Введение

В 2010 г. на базе обогатительной фабрики ООО «Березовский рудник» организовано цианистое выщелачивание золота из флотоконцентрата, получаемого из руды старейшего в России одноименного месторождения. За время эксплуатации участка в процессе совершенствования технологии и аппаратного оформления специалистами рудника удалось поднять извлечение золота в товарный цементат до 95–97 %, при этом содержание металла в хвостах выщелачивания концентрата снизилось до 0,2–0,1 г/т. Необходимо отметить, что сведений о столь высоких показателях прямого выщелачивания золота из пиритного концентрата в литературных источниках не выявлено.

Ввиду специфики работы гидрометаллургических переделов, где применяются цианистые растворы, происходит периодическое изменение состава выщелачивающего раствора, получившее в литературе название «утомляемость» [1]. Данный факт негативно влияет на скорость процессов извлечения и цементации золота и в целом — на эффективность технологии цианистого выщелачивания.

Одним из наиболее важных маркеров, определяющих «утомляемость» раствора, является концентрация меди в оборотных растворах. Ранее проведенные исследования подтвердили негативное влияние «утомленных» растворов на кинетику выщелачивания золота [2]. Согласно теории М.Д. Ивановского при повышенном содержании меди в оборотных растворах на поверхности золота образуются пассивирующие пленки CuCN :



Их плотность зависит от содержания меди в растворе. Образование простого цианида меди становится возможным при падении концентрации цианида в диффузионном слое в процессе растворения золота [1; 3–8].

За годы эксплуатации гидрометаллургического передела содержание меди в оборотном растворе неуклонно возрастало (рис. 1).

Вместе с тем в практике работы гидрометаллургического передела наблюдаются кратковременные (на 1–2 суток) периоды, в течение кото-

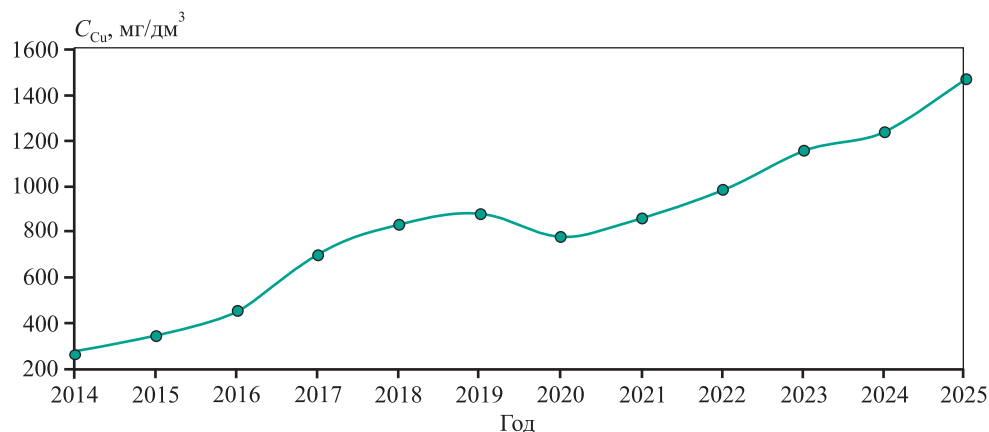


Рис. 1. Среднегодовое содержание меди в оборотном растворе

Fig. 1. Average annual copper concentration in the circulating solution

рых эффективность выщелачивания снижается и содержание золота в хвостах поднимается до 1,0–2,5 г/т. По истечении указанного срока и при сохранении регламентных параметров процесса показатели выщелачивания возвращаются к оптимальному уровню. Результаты оперативных лабораторных опытов позволили исключить из числа возможных причин неудовлетворительно-го извлечения золота периодическое появление в составе концентрата крупного золота, на растворение которого требуется затратить больше времени, и отклонения от технологического регламента, такие как низкая концентрация цианида при ведении процесса и недостаточная степень вскрытия металла. При этом анализ хвостов выщелачивания показывал возможность доизвлечения золота до достигнутых ранее значений 0,1–0,2 г/т.

Замечено, что повышенное содержание меди в оборотных растворах негативно влияет на процесс осаждения золота на установке Меррилл-Кроу (рис. 2). Возможными причинами данного факта являются увеличенный расход цинка на восстановление меди и пассивация поверхности частиц цинка плотным слоем восстановленной меди. Дополнительные осложнения возникают при фильтровании цементного осадка. При повышенных концентрациях меди в продуктивном растворе гидравлическое сопротивление слоя цементата резко возрастает. В любом случае цементация золота затрудняется, и производительность установки падает.

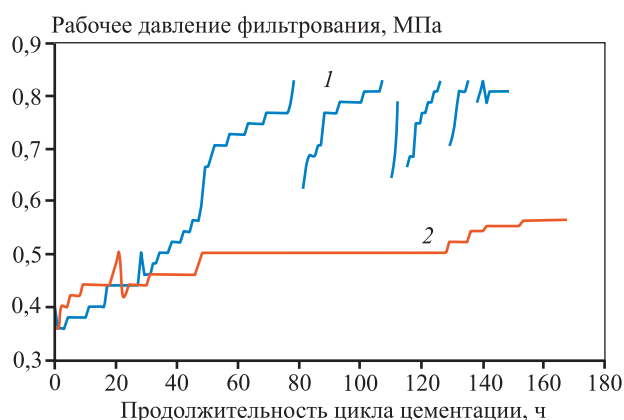


Рис. 2. Изменение давления на фильтре осадка в процессе осаждения золота

1 — цикл с повышенным содержанием меди;
2 — стандартный цикл

Fig. 2. Change in filter pressure during gold precipitation
1 — cycle with elevated copper content; 2 — standard cycle

Таблица 1. Особенности цинковых осадков

Table 1. Characteristics of zinc precipitates

№ цикла	Масса осадка, кг	C_{Cu} , % (кг)
1 (аномальный)	171	56,0 (96,1)
2 (обычный)	80,4	8,9 (7,15)

Прерывистость кривой 1 связана с остановками узла Меррилл-Кроу по причине резкого повышения давления на фильтр-прессе. При остановке слой цементата частично отслаивался с вертикальной фильтрующей поверхности, и при повторном пуске нагнетающего насоса давление временно возвращалось к регламентным значениям. По окончании цикла при визуальном осмотре цементата обнаружены плотные пластины, похожие на металлическую медь. Последующий анализ выявил повышенный выход цементата (более чем в 2 раза) и аномально высокое содержание в нем Cu. Результаты представлены в табл.1.

Для частичного решения данной проблемы рекомендуется в продуктивный раствор вводить большее количество растворимых солей свинца, которые минимизируют возможности осаждения меди [3]. Однако практика показывает, что при повышенных содержаниях меди эффективность добавки свинца падает.

Еще одной особенностью наличия меди в оборотных растворах является ее негативное влияние на аналитическое определение концентрации цианида [9], что влечет за собой потенциальное нарушение технического регламента и недоизвлечение золота.

В литературных источниках рекомендуются несколько методов выведения меди из оборотных растворов, которые можно разделить на группы в зависимости от вида получаемого Cu-содержащего продукта: CuCN — ARV-процесс [1; 10,], Cu₂S — MNR-процесс [11–16], Cu(OH)₂ — обработка растворов окислителями [17–20], Cu⁰ — цементация меди цинком, электролиз [3].

В настоящей работе рассмотрено применение комбинированной схемы кондиционирования оборотных растворов, которая включает 2 стадии.

1. Применение обратноосмотической технологии для концентрирования примесей в меньшем объеме. Обратный осмос (ОО) — это технология, основанная на удалении из воды ионов, молекул и примесей через мембраны под действием высокого давления [21–24]. При использовании ОО исходный раствор разделяют на 2 продукта: концентрат

и пермеат. Пермеат — это очищенный от примесей раствор, а концентрат содержит в себе практически все компоненты исходного раствора. Объемы этих продуктов, а также коэффициент разделения тех или иных растворенных веществ зависят от свойств мембраны и давления в системе.

2. Очистка концентрата от примесей за счет образования труднорастворимых простых цианидов. Для осаждения примесей предложено использовать сульфат меди CuSO_4 . Прототипами данного технологического этапа являются процессы обработки растворов солями железа и окисление пероксидом водорода, где растворимые соли меди используются в качестве катализатора в ходе очистки сточных вод от цианидов. [17–20]. Рассмотренный в данной работе метод предусматривает осаждение меди, а также некоторых других примесей, накопившихся в процессе выщелачивания флотоконцентрата.

Таким образом, целью данной работы являлась разработка комбинированной 2-этапной технологии (обратный осмос + химическое осаждение с применением CuSO_4) для кондиционирования оборотных цианистых растворов с высоким содержанием примесей меди, железа и мышьяка, обеспечивающей сокращение объемов обработки и восстановление функциональных свойств растворов для цианистого выщелачивания золота.

Объект исследования и методика эксперимента

Объектом исследования являлся оборотный цианистый раствор, отобранный из технологического цикла выщелачивания золота ООО «Березовский рудник».

Отбор проб оборотного цианистого раствора и продуктов обратноосмотической технологии производили на опытной установке гидрометаллургического передела производительностью $60 \text{ м}^3/\text{ч}$ по исходному раствору, оснащенной полиамидными тонкопленочными композитными мембранами

LP22-8040 с рабочей площадью 2040 м^2 . Температура растворов составляла 20°C , пропорция продуктов ОО по объему — $1 : 1$, входное давление на мембранах — $1,7 \text{ МПа}$. Исходный раствор и продукты осмоса анализировали на содержание металлов и цианида натрия. Полученные результаты представлены в табл. 2. По завершении очистки пермеата от примесей до запланированного уровня раствор возвращали в оборот на цианирование. Дальнейшую работу по удалению примесей из концентрата проводили в лабораторных условиях.

Для осаждения меди было предложено использовать известный процесс [17; 25] образования труднорастворимого соединения — простого цианида меди:



Проведена серия опытов по осаждению меди из концентрата путем добавки раствора CuSO_4 ($C_{\text{Cu}} = 70 \text{ г/дм}^3$) с целью определения дозировки, при которой содержание меди в растворе достигнет минимального значения.

В химический стакан заливали раствор концентрата ($V = 100 \text{ см}^3$) и устанавливали его на магнитную мешалку с перемешиванием. Затем в него одномоментно добавляли заданное количество CuSO_4 и перемешивали в течение 10 мин, после чего полученную суспензию подвергали фильтрации с получением осветленного раствора и осадка. Анализ растворов и растворенного осадка осуществляли методом атомной абсорбции на спектрометре «Квант-2» (Россия), концентрацию NaCN в растворе определяли титрованием азотнокислым никелем, показатель pH измеряли на pH-метре «Анион 4100» (Россия).

Результаты и их обсуждение

По результатам анализа продуктов обратноосмотической технологии (см. табл. 2) подтверждена возможность разделения растворов по содержанию компонентов. В пермеате примеси

Таблица 2. Составы оборотного раствора и продуктов обратного осмоса

Table 2. Composition of the circulating solution and reverse osmosis products

Раствор	C, мг/дм ³					C_{NaCN} , г/дм ³	pH
	Au	Ag	Cu	Fe	As		
Оборотный	0,01	0,01	1196	111	19	0,94	11,13
Пермеат	0,01	0,01	12	0,01	0,6	0,1	11,1
Концентрат	0,01	0,01	2379	222	37	1,78	11,1

практически отсутствуют. Как показали предыдущие исследования [2], кинетика извлечения золота с применением пермеата сопоставима с результатами при использовании технической воды. Данный раствор можно возвращать в технологический процесс, предварительно подкрепив цианистым натрием. Соответственно, объем обрабатываемых растворов сокращается вдвое. Более 99 % анализируемых компонентов исходного раствора содержится в концентрате. Дальнейшие работы по очистке проведены с концентратом, который содержит в себе все примеси исходного раствора. Отсутствие разделения оборотного раствора по золоту и серебру связано с низким содержанием и несовершенством конструкции установки.

Результаты серии из 6 опытов ожидаемо подтверждают зависимость степени осаждения меди из концентрата от расхода сульфата меди (табл. 3, рис. 3). На графике можно выделить два характерных участка.

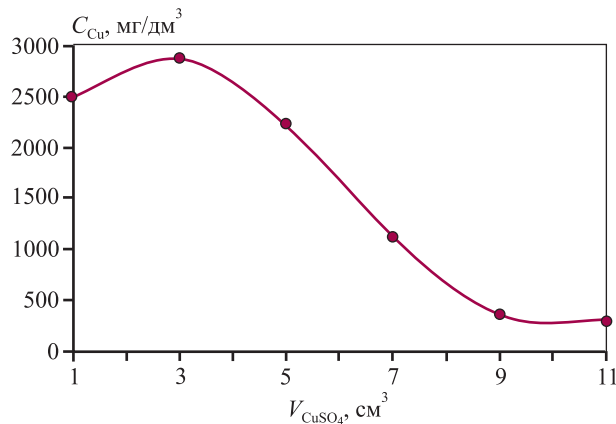
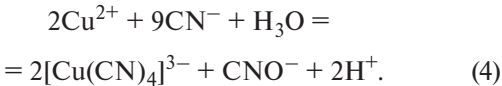
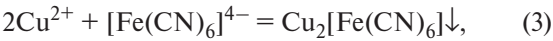


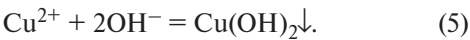
Рис. 3. Изменение остаточного содержания меди в концентрате при добавке CuSO_4

Fig. 3. Change in residual copper concentration in the concentrate with CuSO_4 addition

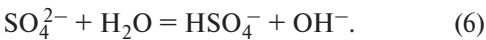
1. Рост содержания меди в концентрате. При небольшом расходе CuSO_4 ($1\text{--}3 \text{ см}^3$) приоритетным является взаимодействие Cu^{2+} с цианистыми комплексами железа, свободными циан-ионом и гидроксил-ионом, что сопровождалось резким падением концентраций железа (3) и циан-иона (4) в растворе, снижением pH до 6,67, а также увеличением содержания меди (4):



Частично катион меди гидролизуетс я:



2. Снижение содержания меди в концентрате. Дальнейшая добавка CuSO_4 в раствор инициировала взаимодействие Cu^{2+} с цианистыми комплексами меди с последующим образованием CuCN (1) и $\text{Cu}(\text{OH})_2$ (5). Допускается стабилизация pH за счет буферных свойств сульфат-иона:



Также необходимо отметить снижение содержания мышьяка в концентрате. Механизм этого явления требует дальнейшего изучения.

Полученный в процессе очистки раствор (очищенный концентрат) можно возвращать в производственный оборот путем смешения с пермеатом, предварительно подкрепив едким натром и цианидом натрия. Сравнение результатов анализов смеси очищенного концентрата и пермеата с исходным оборотным раствором представлено в табл. 4.

Таблица 3. Изменение состава концентрата

Table 3. Change in concentrate composition

$V_{\text{CuSO}_4}, \text{см}^3$	$C, \text{мг/дм}^3$					$C_{\text{NaCN}}, \text{г/дм}^3$	pH
	Au	Ag	Cu	Fe	As		
1	0,01	0,01	2500	128	7,5	0,06	7,86
3	0,01	0,01	2875	0	6,6	0	6,67
5	0,01	0,01	2240	0	5,5	0	6,56
7	0,01	0,01	1137	0	4,5	0	6,46
9	0,01	0,01	367	0	1,9	0	6,22
11	0,01	0,01	302	0	0,6	0	6,20

Таблица 4. Сравнительный анализ растворов

Table 4. Comparative analysis of solutions

Раствор	C, мг/дм ³				
	Au	Ag	Cu	Fe	As
Оборотный	0,01	0,01	1196	111	19
Пермеат + очищенный концентрат	0,01	0,01	157	0,005	0,6

При максимальной добавке CuSO_4 получен осадок массой 0,98 г, состав которого, по результатам анализа, представлен ниже, мас. %:

Cu 68,3
 Fe 4,2
 As 0,37
 Прочее 27,13

Основные компоненты осадка — смесь $\text{Cu}(\text{OH})_2$ и CuCN . Столь богатый осадок после простейшей обработки, например прокалки, может рассматриваться в качестве товарного продукта. После его химической переработки часть меди в виде CuSO_4 может быть использована для кондиционирования новых порций оборотных «утомленных» растворов.

Выводы

1. Использование технологии, основанной на обратном осмосе, позволяет в 2—3 раза сконцентрировать примеси, накапливающиеся в оборотных цианистых растворах.

2. Определена возможность использования растворимых солей меди (CuSO_4) для выведения примесей из «утомленных» растворов в виде осадка с высоким содержанием меди.

3. Степень извлечения примесей из оборотного раствора при осаждении сульфатом меди достигает 86,8 % меди, 100 % железа и 96,8 % мышьяка.

Список литературы/References

1. Плаксин И.Н. Металлургия благородных металлов. М.: Металлургиздат, 1958. 366 с.
2. Самофеев А.М., Абдрахманова А.С., Лобанов В.Г., Поморцев В.Н. Исследование особенностей выщелачивания золота из флотоконцентрата ООО «Березовский рудник». В сб.: *Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья*: Материалы XXVIII науч.-практ. конф. (Екатеринбург, 6—

7 апреля 2023 г.). Екатеринбург: ФортДиалог, 2023. С. 277—280.

3. Масленицкий И.Н., Чугаев Л.В., Борбат В.Ф. Металлургия благородных металлов. Под ред. Л.В. Чугаева. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1987. 432 с.
4. Sceresini B. Gold-copper ores. In: *Developments in Mineral Processing* (Eds. Mike D., Adams B.A.). Amsterdam: Elsevier, 2005. Vol. 15. P. 789—824.
5. Gonzalo Larrabure J.C., Rodriguez-Reyes J.C.F. A review on the negative impact of different elements during cyanidation of gold and silver from refractory ores and strategies to optimize the leaching process. *Minerals Engineering*. 2021;173:107194. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107194>
6. Барченков В.В. Обогащительные и гидрометаллургические процессы извлечения золота из руд. Владимир: Транзит-ИКС, 2022. 544 с.
7. Maganga S., Wikedzi A., Budeba M., Manyele S. Overview of the challenges and opportunities in processing complex gold-copper ores. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2023;40:1—18. <https://doi.org/10.1007/s42461-023-00854-7>
8. Medina D., Anderson C. A review of the cyanidation treatment of copper-gold ores and concentrates. *Metals*. 2020;10(7):897. <https://doi.org/10.3390/met10070897>
9. Yilmaz E., Ahlatci F., Celep O., Yazэсэ E., Deveci H. Interference of metals with the determination of free cyanide. In: *Proceedings of the 14th International Mineral Processing Symposium* (Kusadasi, Turkey, 15—17 October 2014). 2014. P. 1027—1033. <https://doi.org/10.13140/2.1.3302.3682>
10. Adams M.D. Advances in gold ore processing. Guildford: Elsevier Science & Technology, 2001. 1076 p.
11. Estay H., Ruby-Figueroa R., Gim-Krumm M., Quilaqueo M., Seriche G., Díaz-Quezada S., Cortés I., Barros L. The SuCy process: A more efficient and safer technology to recover cyanide and copper in cyanidation plants. In: *Proc. of 12th International Conference on Process Hydrometallurgy* (Hydroprocess 2020). 2020. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10213.63208>
12. Seriche G., Quilaqueo M., Barros L., Gim-Krumm M., Cortés I., Troncoso E., Ruby-Figueroa R., Estay H. Integrated membrane process coupled with metal sulfide precipitation to recover zinc and cyanide. *Minerals*. 2022;12(2):229. <https://doi.org/10.3390/min12020229>
13. Parga J.R., Valdés J.V., Valenzuela J.L., Gonzalez G., Pérez L.M.J., Cepeda T.F. New approach for lead, zinc and copper ions elimination in cyanidation process to improve the quality of the precipitate. *Materials Sciences and Applications*. 2015;6:117—129. <https://doi.org/10.4236/msa.2015.62015>

14. Estay H., Gim-Krumm M., Seriche G., Quilaqueo M., Barros L., Ruby-Figueroa R., Romero J., Troncoso E. Optimizing the SART process: A critical assessment of its design criteria. *Minerals Engineering*. 2020;146:106116. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106116>
15. Alonso-González O., Nava-Alonso F., Uribe-Salas A. Copper removal from cyanide solutions by acidification. *Minerals Engineering*. 2009;22:324–329. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.09.004>
16. Kassymova D., Sapinov R., Kushakova L., Kulenova N., Shoshay Z., Adylkanova M. Optimization of copper recovery from cyanide leaching solutions used in gold–copper ore processing using probabilistic–deterministic experimental design. *Processes*. 2025;13(1):61. <https://doi.org/10.3390/pr13010061>
17. Меретуков М.А., Орлов А.М. Металлургия благородных металлов: Зарубежный опыт. М.: Металлургия, 1990. 416 с.
18. Knorre H., Griffiths A. Cyanide detoxification with hydrogen peroxide using Degussa process. In: *Proc. of Conference on Cyanide and the Environment* (Tucson, Arizona, 1984). Ed. by D. Van Zyl. Colorado State University, 1995. Vol. 2. P. 519–530.
19. Chen F., Zhao X., Liu H., Qu J. Reaction of $\text{Cu}(\text{CN})_3^{2-}$ with H_2O_2 in water under alkaline conditions: Cyanide oxidation, $\text{Cu}^+/\text{Cu}^{2+}$ catalysis and H_2O_2 decomposition. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2014;158–159:85–90. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.04.010>
20. Sarla M., Pandit M., Tyagi D.K., Kapoor J. Oxidation of cyanide in aqueous solution by chemical and photo-chemical process. *Journal of Hazardous Materials*. 2005;116(1–2):49–56. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.06.035>
21. Goyburo-Chávez C., Mendez-Ruiz J.I., Jiménez-Oyola S., Romero-Crespo P., Gutierrez L., Valverde-Armas P.E. Pilot-scale reverse osmosis treatment of gold cyanidation effluent for the removal of cyanide, heavy metal(loid)s, and ionic species. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2024;9:100688. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2024.100688>
22. Vásquez Salazar E.E., Hurtado Bolaños F.P. Cyanide compounds removal efficiency in a reverse osmosis system using a water supply from a co-precipitation chemical process. *Desalination and Water Treatment*. 2021;229:235–242. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27390>
23. Pabby A.K., Rizvi S.S.H., Sastre A.M. (Eds.) Handbook of membrane separations: Chemical, pharmaceutical, food, and biotechnological applications. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2022. 1200 p. <https://doi.org/10.1201/9781003285656>
24. Samaei S.M., Gato-Trinidad S., Altaee A. Performance evaluation of reverse osmosis process in the post-treatment of mining wastewaters: Case study of Costerfield mining operations, Victoria, Australia. *Journal of Water Process Engineering*. 2020;34:101116. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.101116>
25. Способ извлечения меди из цианистых растворов и регенерации цианидов: Заявка № 2024137940 (РФ). 2024.

Информация об авторах

Александр Михайлович Самофеев – аспирант кафедры металлургии цветных металлов (МЦМ), Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ); зам. ген. директора по исследовательской деятельности и науке, ООО «Березовский рудник».

<https://orcid.org/0009-0000-0797-0892>

E-mail: alexander.samofeev@gmail.com

Владимир Геннадьевич Лобанов – к.т.н., доцент кафедры МЦМ, УрФУ.

<https://orcid.org/0000-0001-6450-8434>

E-mail: lobanov-vl@yandex.ru

Фарит Миннихметович Набиуллин – ген. директор ООО «Березовский рудник».

<https://orcid.org/0009-0003-6557-0274>

E-mail: info@ooobru.ru

Александр Витальевич Третьяков – исп. директор ООО «Березовский рудник».

<https://orcid.org/0009-0000-9853-3072>

E-mail: info@ooobru.ru

Information about the authors

Alexandr M. Samofeev – Postgraduate Student of the Department of non-ferrous metallurgy (NFM) of Ural Federal University n.a. the First President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU); Deputy General Director for research and science of LLC “Berezovsky Rudnik”.

<https://orcid.org/0009-0000-0797-0892>

E-mail: alexander.samofeev@gmail.com

Vladimir G. Lobanov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of NFM, UrFU.

<https://orcid.org/0000-0001-6450-8434>

E-mail: lobanov-vl@yandex.ru

Farit M. Nabiullin – General Director of LLC “Berezovsky Rudnik”.

<https://orcid.org/0009-0003-6557-0274>

E-mail: info@ooobru.ru

Alexandr V. Tretyakov – Executive Director of LLC “Berezovsky Rudnik”.

<https://orcid.org/0009-0000-9853-3072>

E-mail: info@ooobru.ru

Вклад авторов

А.М. Самофеев — определение цели работы, формирование основной концепции, проведение экспериментов, участие в обсуждении результатов, написание статьи.

В.Г. Лобанов — научное руководство, определение цели работы, формирование основной концепции, участие в обсуждении результатов, корректировка текста.

Ф.М. Набиуллин — постановка задачи, формирование основной концепции, обеспечение ресурсами, участие в обсуждении результатов.

А.В. Третьяков — определение цели работы, формирование основной концепции, участие в обсуждении результатов.

Contribution of the authors

A.M. Samofeev — defined the objectives of the study, developed the main concept, conducted experiments, participated in the discussion of results, and wrote the manuscript.

V.G. Lobanov — provided scientific supervision, defined the objectives of the study, developed the main concept, participated in the discussion of results, and revised the text.

F.M. Nabiullin — formulated the research task, developed the main concept, provided resources, and participated in the discussion of results.

A.V. Tretyakov — defined the objectives of the study, developed the main concept, and participated in the discussion of results.

Статья поступила в редакцию 10.05.2025, доработана 04.08.2025, подписана в печать 06.08.2025

The article was submitted 10.05.2025, revised 04.08.2025, accepted for publication 06.08.2025