

МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья

УДК 669.213.6

EDN: HNUWVW

DOI: 10.21285/1814-3520-2025-3-389-398



Усовершенствованная методика рационального анализа золота в углистом сорбционно-активном минеральном сырье

А.В. Бывальцев^{1✉}, О.Д. Хмельницкая², Г.И. Войлошников³,
Е.В. Богородский⁴, М.А. Гончарук⁵

¹⁻⁵Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов, Иркутск, Россия

⁵Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Резюме. Цель – разработка усовершенствованной методики и повышение достоверности рационального анализа золота в углистом сорбционно-активном минеральном сырье. При исследовании высокосорбционно-активного сырья классическая методика рационального анализа золота приводит к искажению результатов: доля цианируемого золота оказывается заниженной, а часть извлекаемого золота ошибочно отнесена к упорной форме. Это обусловлено высокой сорбционной активностью природного органического углерода, который активно сорбирует золото из жидкой фазы цианистой пульпы, конкурируя с искусственными сорбентами на всех стадиях выщелачивания. Разработана усовершенствованная методика рационального анализа высокосорбционно-активного сырья, включающая двухстадийную обработку на каждом этапе: сначала проводится цианирование в стандартных условиях с увеличенной загрузкой сорбента, затем – замена сорбента на свежий и высокотемпературная сорбционная обработка при температуре 80–95 °C в течение 2 ч. Методика была апробирована на нескольких видах углистого минерального сырья и позволила оценить полноту извлечения золота при цианировании. Так, результаты показали повышение доли золота в цианируемой форме на 4,2–12,5% по сравнению с классической методикой, что позволяет более точно дифференцировать формы нахождения металла и скорректировать технологические подходы к переработке сорбционно-активного сырья. Применение данной методики особенно важно для руд с высоким содержанием органического углерода и высокой сорбционной активностью, так как она обеспечивает более достоверные фазовые характеристики золота в сырье и позволяет производить корректный выбор технологической схемы переработки данного вида сырья. Методика рекомендована для внедрения в лабораторную, а также производственную практику.

Ключевые слова: золото, рациональный анализ, цианирование, углистое вещество, сорбционная активность

Для цитирования: Бывальцев А.В., Хмельницкая О.Д., Войлошников Г.И., Богородский Е.В., Гончарук М.А. Усовершенствованная методика рационального анализа золота в углистом сорбционно-активном минеральном сырье // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 3. С. 389–398. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-389-398>. EDN: HNUWVW.

METALLURGY

Original article

Improved gold diagnostic leaching procedure for carbonaceous preg-robbing ores

Alexander V. Byaltsev^{1✉}, Olga D. Khmelnitskaya², Grigoriy I. Voiloshnikov³
Evgeniy V. Bogorodskiy⁴, Maksim A. Goncharuk⁵

¹⁻⁵Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds, Irkutsk, Russia

⁵Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The article presents an improved procedure for the diagnostic leaching of gold in carbonaceous preg-robbing mineral ores. When researching highly preg-robbing ores, classic diagnostic gold leaching approaches often lead to distorted results: the proportion of cyanidable gold is underestimated, while recoverable gold is erroneously attributed to refractory forms. This discrepancy arises from the high natural sorption activity of organic carbon, which interferes with artificial sorbents at all leaching stages to competitively adsorb gold from the liquid

phase of cyanide pulp. An advanced diagnostic two-stage leaching procedure for highly preg-robbing materials has been developed: first, cyanidation is carried out under standard conditions with an increased sorbent load, then high-temperature sorption processing at a temperature of 80–95 °C for 2 hours is carried out with fresh sorbent. Tests carried out on various carbonaceous mineral products demonstrated improved gold recovery efficiency during cyanidation. The 4.2–12.5 % increase in obtained cyanidable gold as compared to the conventional method enables more precise differentiation of gold forms and optimization of processing strategies for preg-robbing ores. This procedure is particularly valuable for ores having a high organic carbon content and strong preg-robbing capacity due to providing more reliable phase characterization of gold and supporting accurate selection of processing technologies. The protocol is recommended for implementation in both laboratory and industrial practice.

Keywords: gold, diagnostic leaching, cyanidation, carbonaceous matter, preg-robbing

For citation: Byvaltsev A.V., Khmelnitskaya O.D., Voiloshnikov G.I., Bogorodskiy E.V., Goncharuk M.A. Improved gold diagnostic leaching procedure for carbonaceous preg-robbing ores. *iPolytech Journal*. 2025;29(3):389-398. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-389-398>. EDN: HNUWW.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия наблюдается постоянное ухудшение качества минерального золотосодержащего сырья, вовлекаемого в переработку. В настоящее время значительная часть (~ 1/4) минерально-сырьевых золотых запасов находится в «упорных» рудах, характеризующихся сорбционной активностью (СА), когда выщелоченное в цианидный раствор золото сорбируется твердой фазой, не извлекается в товарную продукцию и теряется с хвостами в сорбированном виде [1–5].

В большинстве случаев СА проявляет природное углистое вещество (органический углерод) – сорбирующий цианидный комплекс золота $[Au(CN)_2]$. Независимо от типа и механизма действия, природный сорбент действует аналогично искусственноному сорбенту, как правило, добавляемому в процесс цианирования (ионообменные смолы или активные угли), он поглощает растворенное золото из жидкой фазы пульпы и тем самым создает конкуренцию профессиональному сорбенту. При этом равновесная СА твердой фазы обычно существенно ниже, чем СА искусственного сорбента, однако, учитывая ее развитую поверхность (на несколько порядков превосходящую поверхность искусственного сорбента), твердая фаза оказывает существенное влияние в начальный период выщелачивания золота, когда происходит выщелачивание металлического золота. Фактически складывается ситуация, когда искусственный сорбент не успевает извлечь выщелоченное золото и оно сорбируется на природный сорбент, впоследствии теряясь с хвостами цианирования [6–13].

Во многих случаях, и при относительно высоком содержании растворимого (цианируемого) золота в сырье (граммы и десятки граммов на тонну), органический углерод,

входящий в состав сырья, проявляет настолько высокую СА, что золото абсолютно не появляется в жидкой фазе пульпы при цианировании – его концентрация не превышает 0,1 мг/дм³.

В общем случае при обычном цианировании сорбционно-активного сырья никогда не достигается максимально возможное извлечение Au, т.к. и в присутствии искусственного сорбента часть золота все же оказывается сорбирована природным органическим углеродом и остается в твердой фазе. В том числе вышесказанное касается и обычной общепринятой методики рационального (фазового) анализа золота, повсеместно применяемой на золотодобывающих предприятиях и профильных научно-исследовательских организациях [14–21]. При стандартном рациональном анализе сорбционно-активного сырья результаты, получаемые по упорности Au, неверно интерпретируются, т.к. золото, недоизвлеченное на предыдущих стадиях цианирования из-за СА, частично доизвлекается на последующих стадиях цианирования за счет замены сорбента на свежий. Таким образом, упорность, связанная с СА сырья, ошибочно интерпретируется как упорность других типов (вкрапленность в минералах и в пленках, растворимых в NaOH, HCl и т.д.).

Из исследовательской и промышленной золотодобывающей практики известно, что некоторые факторы, как правило, оказывают подавляющее действие на СА минерального сырья [3–21]:

- использование более активного по золоту сорбента приводит к большему извлечению золота при цианировании: наибольшей активностью характеризуются высокоосновные и смешанные смолы типа АМ-2Б, средней – угольные сорбенты, меньшей – низкоосновные смолы типа Purogold;

– величина загрузки сорбента – чем выше загрузка сорбента, тем выше извлечение Au;

– повышение температуры, как правило, приводит к снижению СА твердой фазы.

Каждый из трех факторов по отдельности и совокупно подавляет СА сырья и заметно повышает извлечение Au при цианировании, причем действие этих факторов наблюдается практически для всех типов углистого сорбционно-активного сырья. На основании этих факторов нами предлагается усовершенствованная (модифицированная) методика рационального анализа золота для сорбционно-активного сырья, отличающаяся от обычной двухстадийным цианированием на каждом этапе рационального анализа (цианирование после амальгамации, после обработок NaOH, HCl, HNO₃ и после окислительного обжига):

– первая стадия цианирования проводится в обычных условиях, но с обязательным использованием свежего сорбента (смола или уголь) при повышенной загрузке;

– на второй стадии сорбент заменяется на свежую порцию и проводится высокотемпературная сорбционная обработка (ВСО).

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработка усовершенствованной методики и повышение достоверности рационального анализа золота в углистом сорбционно-активном минеральном сырье.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводили на углистых сорбционно-активных продуктах, характеристики которых приведены в табл. 1. Рациональный анализ на золото проводи-

ли по двум вариантам, схематично изображенным на рис. 1 и 2. Варианты отличались лишь условиями цианирования:

– по обычной методике цианирование вели в одну стадию в стандартных условиях – комнатная температура, отношение Ж:Т = 2:1, концентрация NaCN – 2 г/дм³, pH – 11–12, продолжительность – 24 ч; загрузка свежего сорбента – 10 об. %;

– по предлагаемой методике выщелачивание проводили в две стадии – на первой цианировали в тех же условиях, но при повышенной загрузке сорбента 20 об. %, на второй – сорбент заменяли на свежий (при той же загрузке 20 об. %) и проводили высокотемпературную сорбционную обработку при 80–95°C в течение 2 ч, позволяющую десорбировать золото из природного углистого вещества.

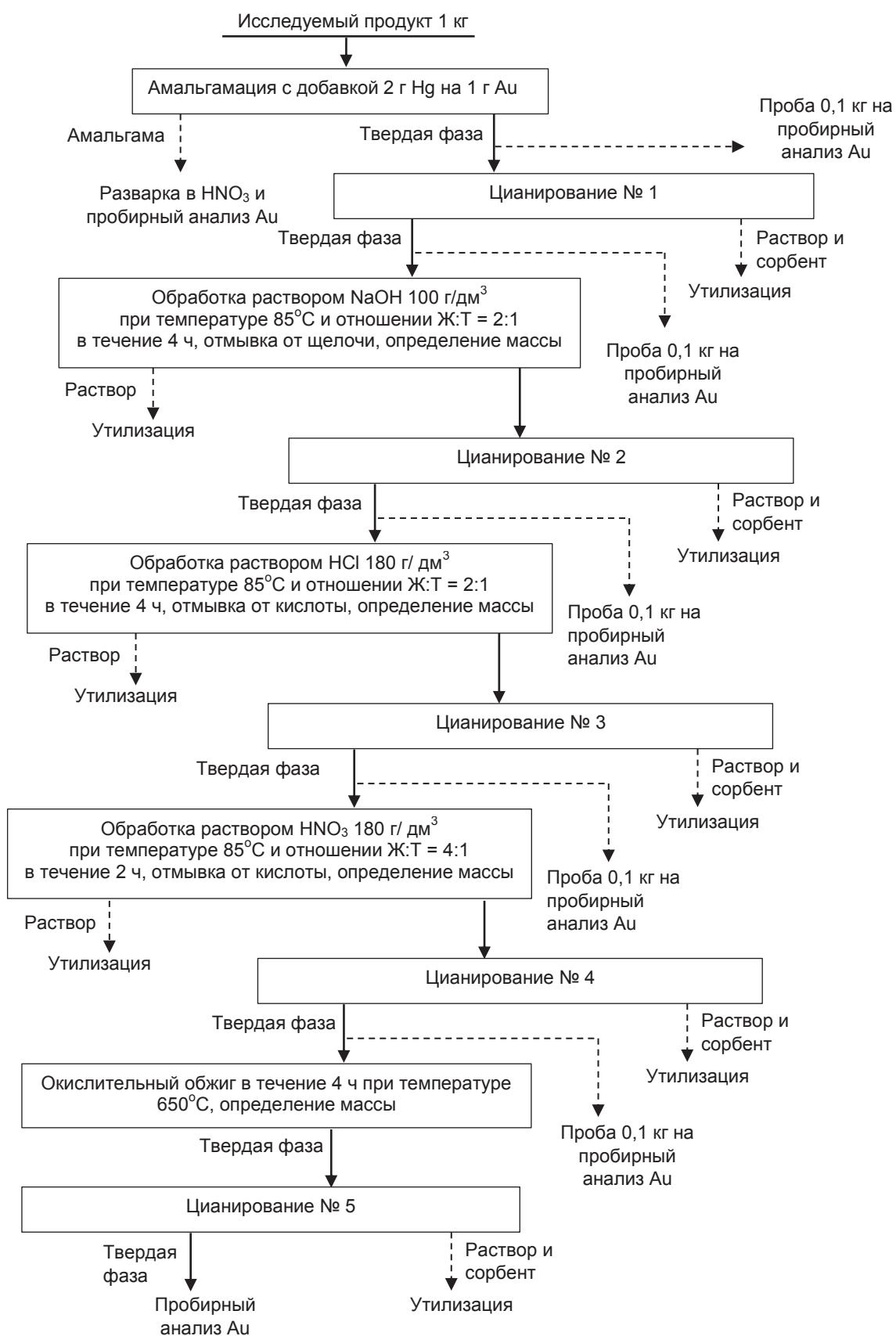
На последнем этапе рационального анализа после обжига проводили лишь стадию обычного цианирования при комнатной температуре, т.к. при корректном ведении обжига органический углерод полностью удаляется из сырья, со снижением СА твердой фазы практически до 0, вследствие чего проведение ВСО не требуется.

Долю золота с определенным характером минерализации (кроме первой стадии – амальгамации) рассчитывали как разницу между исходным содержанием золота до соответствующей обработки (цианирование, NaOH, HCl, HNO₃, обжиг) и содержанием золота в хвостах цианирования (включая вторую высокотемпературную стадию для предлагаемой методики) после этой обработки, с учетом выхода твердой фазы в процессе обработки, отнесенной к исходному содержанию золота в продукте.

Таблица 1. Характеристики исследованных углистых сорбционно-активных продуктов
Table 1. Characteristics of the examined preg-robbing carbonaceous products

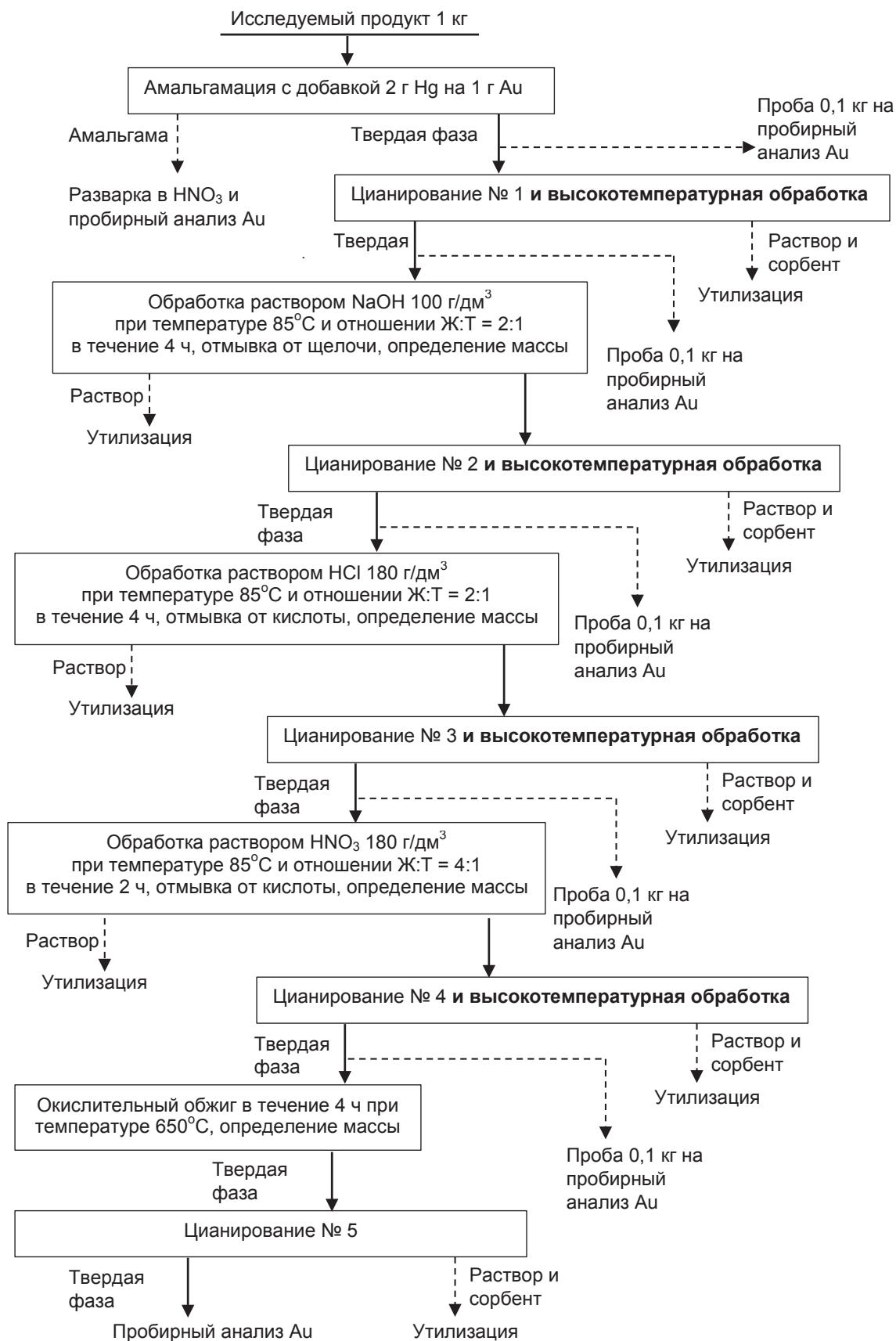
Характеристики исследуемых продуктов		Значения		
Наименование продукта	Флотоконцентрат руды месторождения № 1	Флотоконцентрат руды месторождения № 2	Руда месторождения № 3	
Краткое наименование продукта	Продукт № 1	Продукт № 2	Продукт № 3	
Содержание Au, г/т	14,3	10,0	8,30	
компонентов С(орг), %	4,1	3,2	0,62	
Массовая доля класса минус 0,071 мм, %	93	97	95	
*СА, %	95,3	96,4	98,9	

*Примечание: СА продуктов определена по методике «Иргиредмета» как доля растворимого (цианируемого) золота, сорбируемого твердой фазой пульпы в ходе опытов по цианированию без добавки искусственного сорбента [14].



Примечание: условия цианирования приведены в тексте.

Рис. 1. Схема рационального анализа по обычной методике
Fig. 1. Flowchart of diagnostic leaching using the conventional procedure



Примечание: условия цианирования и высокотемпературной обработки приведены в тексте.

Рис. 2. Схема рационального анализа по усовершенствованной методике
Fig. 2. Flowchart of diagnostic leaching using the improved procedure

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты рационального анализа исследованных продуктов по обычной и предлагаемой методике приведены в табл. 2.

Из полученных результатов видно, что по предлагаемой методике по сравнению с классической:

- доля золота в цианируемой форме оказалась выше на 4,2–12,5%;
- вскрываемого обработкой NaOH, оказалась ниже на 0,1–0,5%;
- HCl, оказалась ниже на 0,5–4,5%;
- HNO₃, оказалась ниже на 1,2–5,9%;
- вскрываемого обжигом, оказалась ниже на 0,1–4,0%;
- тонковкрапленного в породообразующие минералы, оказалась ниже на 0,9–1,9%.

В табл. 3 приведены краткие результаты для ряда продуктов с меньшей СА в пределах 8,0–84,5%, для которых были выполнены аналогичные исследования по классической и усовершенствованной методикам рационального анализа.

Для слабосорбционно-активных продуктов с СА по методике «Иргиредмета» не более 20% обычная методика дает адекватные результаты, однако при СА на уровне 20–40% погрешность рационального анализа (занижение доли золота в цианируемой форме) составила 0,8–2,1%. При величине СА на уровне более 40% погрешность рационального анализа повысилась до 4,3–7,3%. На рис. 3 приведена зависимость погрешности рационального анализа от величины СА для изученных продуктов.

Таблица 2. Результаты рационального (фазового) анализа золота для высокосорбционно-активных продуктов
Table 2. Results of diagnostic (phase) leaching of gold for highly preg-robbing products

Наименование продукта		Продукт № 1		Продукт № 2		Продукт № 3	
Методика		Обычная	Усов.	Обычная	Усов.	Обычная	Усов.
Доля золота, %, с указанным характером минерализации	Цианируемое, в т.ч.	59,4	67,6	88,4	92,6	80,1	92,6
	Амальгамируемое	7,5	7,5	15,7	15,7	35,8	35,8
	Упорное (нецианируемое), в т.ч.	40,6	32,4	11,6	7,4	19,9	7,4
	Извлекаемое после обработки NaOH (ассоциированное с минералами сурьмы, мышьяка, аморфным кремнеземом)	4,8	4,3	1,2	0,8	0,5	0,4
	Извлекаемое после обработки HCl (ассоциированное с гидроксидами железа, хлоритами, карбонатами и др.)	6,3	5,1	1,6	1,1	6,4	1,9
	Извлекаемое после обработки HNO ₃ (ассоциированное с сульфидами)	12,5	11,3	4,3	2,2	8,3	2,4
	Извлекаемое после обжига (ассоциированное с углеродом)	8,7	4,7	2,3	2,0	0,5	0,4
	Тонковкрапленное в породообразующие минералы	8,3	7,0	2,2	1,3	4,2	2,3
	Итого в исходном	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Разница результатов по модифицированной методике рационального анализа по сравнению с обычной методикой, % (доля золота)	Цианируемое, в т.ч.	8,2		4,2		12,5	
	Амальгамируемое	0		0		0	
	Упорное (нецианируемое), в т.ч.	-8,2		-4,2		-12,5	
	Извлекаемое после обработки NaOH	-0,5		-0,4		-0,1	
	Извлекаемое после обработки HCl	-1,2		-0,5		-4,5	
	Извлекаемое после обработки HNO ₃	-1,2		-2,1		-5,9	
	Извлекаемое после обжига	-4,0		-0,3		-0,1	
	Тонковкрапленное в породообразующие минералы	-1,3		-0,9		-1,9	

Таблица 3. Краткие результаты рационального анализа для продуктов с различной сорбционной активностью
Table 3. Summary results of diagnostic leaching for products with a different preg-robbing index

Наименование продукта		Руда № 11	Руда № 12	Руда № 13	Руда № 14	Руда № 15	Флото-концентрат № 3	Флото-концентрат № 4
Содержание компонентов	Au, г/т	0,84	1,6	1,78	2,40	1,27	11,8	27,3
	C(орг), %	0,28	0,55	0,40	0,83	0,18	1,28	1,74
Сорбционная активность твердой фазы по методике «Иргиредмета», %		8,0	12,3	27,4	38,0	46,2	70,8	84,5
Разница результатов по усовершенствованной методике рационального анализа по сравнению с обычной методикой, % (доля золота)	Цианируемое, в т.ч.	0,0	0,0	0,8	2,1	4,3	4,7	7,3
	Упорное (нецианируемое), в т.ч.	0,0	0,0	-0,8	-2,1	-4,3	-4,7	-7,3
	Извлекаемое после обработки NaOH	0,0	0,0	0,0	-0,4	-0,2	0,0	-1,2
	Извлекаемое после обработки HCl	0,0	0,0	-0,3	-0,3	-0,8	-1,7	-1,0
	Извлекаемое после обработки HNO ₃	0,0	0,0	-0,4	-1,0	-1,8	-1,3	-2,2
	Извлекаемое после обжига	0,0	0,0	-0,1	-0,2	-0,7	-0,7	-1,7
	Тонковкрапленное в поро-дообразующие минералы	0,0	0,0	0,0	-0,2	-0,8	-1,0	-1,2

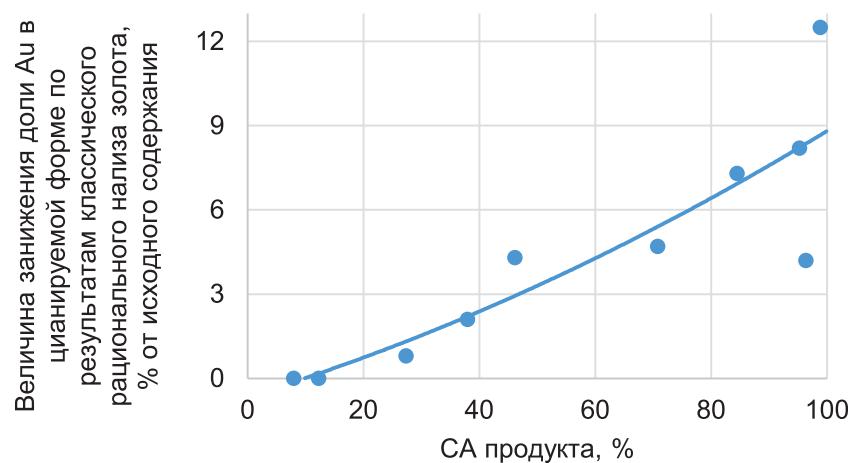


Рис. 3. Занижение доли золота в цианируемой форме по обычному рациональному анализу в зависимости от величины сорбционной активности твердой фазы

Fig. 3. Underestimation of cyanide-soluble gold proportion by conventional diagnostic leaching as a function of preg-robbing index of the solid phase

Исходя из полученной зависимости, для обеспечения погрешности рационального анализа на уровне не более 3% рекомендуется применять усовершенствованную методику для продуктов с СА по методике «Иргиредмета» на уровне более 40%. Если СА составляет меньшую величину, применение обычной методики обеспечивает корректные результаты, а использование усовершенствованной методики является нецелесообразным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам обычного рационального анализа для изученных умеренно- и высоко-сорбционно-активных продуктов (с СА более 40%) занижение доли золота в цианируемой форме составило 4,2–12,5%. Согласно классической методике, указанное количество золота должно быть ошибочно отнесено к различным видам упорности (вкрапленность в сульфидах, породообразующих минералах

и т.д.), хотя фактически оно относится к цианируемой форме, но трудноизвлекаемой из-за высокой СА сырья. Отсюда следует, что высокая СА сырья «маскируется» под другие виды упорности из-за невозможности извлечь все цианируемое золото за одну стадию цианирования в обычном режиме.

Рекомендуется использовать разработанную методику для высокосорбцион-

но-активного сырья (с СА более 40%) с включением дополнительной высокотемпературной стадии для получения более достоверных результатов рационального анализа золота, что позволит принимать более эффективные решения при разработке технологий переработки данного типа сырья и в ходе самой промышленной переработки.

Список источников

1. Edahbi M., Ounoughi M., Bouzahzah H., Boujlel K. 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>.
2. Saders J.A., Gravel J., Janke L., Hall L. In-depth study on carbon speciation focussed on graphite // Symposium on Strategic and Critical Materials Proceedings (Victoria, 13–14 November 2015). Victoria: British Columbia Ministry of Energy and Mines, 2015. P. 187–191.
3. Bas A.D., Altinkaya P., Yazici E.Y., Deveci H. Preg-robbing potential of sulphide-bearing gold ores // Proceedings of 13th International Mineral Processing Symposium-IMPS (Bodrum, 10–12 October 2012). Bodrum, 2012. P. 613–618.
4. Borges G.F. Efeito preg-robbing em minerais auríferos por compostos carbonáceos: estado da arte. Ouro Preto: Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2021. 48 p.
5. Mabwe N.R. Potential pre-treatment and processing routes for recovery of gold from complex (refractory) gold ores. A review // Proceedings of the 2nd African International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (Harare, 7–10 December 2020). Harare, 2020. P. 1708–1715.
6. Cetin M.C., Altun N.E., Atalay M.Ü., Büyüktanır K. Bottle roll testing for cyanidation of gold ores: problems related to standardized procedures on difficult-to-process ores // Proceedings of the 3rd World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering (Rome, 8–10 June 2017). Rome, 2017. P. 148. <https://doi.org/10.11159/mmme17.148>.
7. Dunne R., LeVier M., Acar S., Kappes R. Keynote address: Newmont's contribution to gold technology // World Gold Conference (Johannesburg, 2009). Johannesburg: Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2009. P. 221–230.
8. Бывальцев А.В., Войлошников Г.И., Хмельницкая О.Д., Богородский Е.В. Проблемы переработки углистых сорбционноактивных золотых руд // Теория и технология металлургического производства. 2024. Т. 51. № 4. С. 18–23. EDN: PTZFQB.
9. Asamoah R.K., Amankwah R.K., Addai-Mensah J. Cyanidation of refractory gold ores: A Review // 3rd UMaT Biennial International Mining and Mineral Conference (Tarkwa, Juli 2014). Tarkwa, 2014. P. 204–212. <https://doi.org/10.13140/2.1.4772.6407>.
10. Mustapha A., Asamoah R.K., Ofori-Sarpong G., Amankwah R.K. Preg-robbing characteristics of gold ores in Ghana // 3rd UMaT Biennial International Mining and Mineral Conference (Tarkwa, Juli 2014). Tarkwa, 2014. P. 192–196.
11. Ahtiainen R., Lundström M., Liipo J. Preg-robbing verification and prevention in gold chloride-bromide leaching // Minerals Engineering. 2018. Vol. 128. P. 153–159. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.08.037>.
12. Бывальцев А.В., Войлошников Г.И., Хмельницкая О.Д. Методика подготовки углеродсодержащих хвостов цианирования к анализу // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 1. С. 123–132. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-1-123-132>. EDN: IOWITS.
13. Helm M.M., Vaughan J.P., Staunton W.P. Evaluation of preg-robbing in Goldstrike carbonaceous ore using Raman spectroscopy // Proceedings of the 50th Conference of Metallurgists (Montreal, 2–5 October 2011). Montreal, 2011. P. 595–606.
14. Лодейщиков В.В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд. В 2-х т.; т. 2. Иркутск: Иргиредмет, 1999. 786 с.
15. Зеленов В.И. Методика исследований золото- и серебросодержащих руд. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1989. 302 с.
16. Stephen R.S., Anuar W.N.S., Ismail S., Jabit N.A. Characterisation and diagnostic leaching of gold-bearing mineral ore, east coast peninsular Malaysia // Malaysian Journal of Microscopy. 2021. Vol. 17. Iss. 2. P. 139–153. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(00\)00156-4](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(00)00156-4).
17. Guner M.K., Bulut G., Hassanzadeh A., Lode S., Aasly K. Automated mineralogy and diagnostic leaching studies on bulk sulfide flotation concentrate of a refractory gold ore // Minerals. 2023. Vol. 13. Iss. 10. P. 1243. <https://doi.org/10.3390/min13101243>.
18. Henley K.J., Clarke N.C., Sauter P. Evaluation of a diagnostic leaching technique for gold in native gold and gold ± silver tellurides // Minerals Engineering. 2001. Vol. 14. Iss. 1. P. 1–12. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(00\)00156-4](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(00)00156-4).

19. Celep O., Alp I., Deveci H. Application of diagnostic leaching technique for refractory gold ores // D.P.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi. 2008. No. 16. P. 81–90.
20. Бекпулатов Ж.М., Худайбердиев Ф.Т. Изучение вещественного состава и разработка технологии переработки золотосодержащей пробы руды одного из месторождений Республики Узбекистан // Инновационная наука. 2017. Т. 3. № 4. С. 20–23. EDN: YLZMAH.
21. Шумилова Л.В. Технологическое тестирование упорных золотосодержащих руд (на примере месторождения Кокпатас) // Вестник Читинского государственного университета. 2009. № 3. С. 42–47. EDN: KYAPVT.

References

1. Edahbi M., Ounoughi M., Bouzahzah H., Boujlel K. 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>.
2. Saders J.A., Gravel J., Janke L., Hall L. In-depth study on carbon speciation focussed on graphite. In: *Symposium on Strategic and Critical Materials Proceedings*. 13–14 November 2015, Victoria. Victoria: British Columbia Ministry of Energy and Mines; 2015, p. 187-191.
3. Bas A.D., Altinkaya P., Yazici E.Y., Deveci H. Preg-robbing potential of sulphide-bearing gold ores. In: *Proceedings of 13th International Mineral Processing Symposium-IMPS*. 10–12 October 2012, Bodrum. Bodrum; 2012, p. 613-618.
4. Borges G.F. Efeito preg-robbing em minerais auríferos por compostos carbonáceos: estado da arte. Ouro Preto: Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto; 2021, 48 p.
5. Mabwe N.R. Potential pre-treatment and processing routes for recovery of gold from complex (refractory) gold ores. A review. In: *Proceedings of the 2nd African International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. 7–10 December 2020, Harare. Harare; 2020, p. 1708-1715.
6. Cetin M.C., Altun N.E., Atalay M.Ü., Büyüktanır K. Bottle roll testing for cyanidation of gold ores: problems related to standardized procedures on difficult-to-process ores. In: *Proceedings of the 3rd World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering*. 8–10 June 2017, Rome. Rome; 2017, p. 148. <https://doi.org/10.11159/mmme17.148>.
7. Dunne R., LeVier M., Acar S., Kappes R. Keynote address: Newmont’s contribution to gold technology. In: *World Gold Conference*. 2009, Johannesburg. Johannesburg: Southern African Institute of Mining and Metallurgy; 2009, p. 221-230.
8. Byvaltsev A.V., Voiloshnikov G.I., Khmelnitskaya O.D., Bogorodskiy E.V. Problems of processing carbonaceous sorption-active gold ores. *The theory and process engineering of metallurgical production*. 2024;51(4):18-23. (In Russ.). EDN: PTZFQB.
9. Asamoah R.K., Amankwah R.K., Addai-Mensah J. Cyanidation of refractory gold ores: A Review. In: *3rd UMaT Biennial International Mining and Mineral Conference*. Juli 2014, Tarkwa. Tarkwa; 2014, p. 204-212. <https://doi.org/10.13140/2.1.4772.6407>.
10. Mustapha A., Asamoah R.K., Ofori-Sarpong G., Amankwah R.K. Preg-robbing characteristics of gold ores in Ghana. In: *3rd UMaT Biennial International Mining and Mineral Conference*. Juli 2014, Tarkwa. Tarkwa; 2014, p. 192-196.
11. Ahtiainen R., Lundström M., Liipo J. Preg-robbing verification and prevention in gold chloride-bromide leaching. *Minerals Engineering*. 2018;128:153-159. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.08.037>.
12. Byvaltsev A.V., Voiloshnikov G.I., Khmelnitskaya O.D. A procedure for preparing carbonaceous cyanidation tailings for gold fire assay. *iPolytech Journal*. 2025;29(1):123-132. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-1-123-132>.
13. Helm M.M., Vaughan J.P., Staunton W.P. Evaluation of preg-robbing in Goldstrike carbonaceous ore using Raman spectroscopy. In: *Proceedings of the 50th Conference of Metallurgists*. 2–5 October 2011, Montreal. Montreal; 2011, p. 595-606.
14. Lodeishchikov V.V. *Technology of gold and silver extraction from refractory ores*. Irkutsk: Irgiredmet; 1999, 786 p. (In Russ.).
15. Zelenov V.I. *Methodology for studying gold- and silver-bearing ores*. Moscow: Nedra; 1989, 302 p. (In Russ.).
16. Stephen R.S., Anuar W.N.S., Ismail S., Jabit N.A. Characterisation and diagnostic leaching of gold-bearing mineral ore, east coast peninsular Malaysia. *Malaysian Journal of Microscopy*. 2021;17(2):139-153.
17. Guner M.K., Bulut G., Hassanzadeh A., Lode S., Aasly K. Automated mineralogy and diagnostic leaching studies on bulk sulfide flotation concentrate of a refractory gold ore. *Minerals*. 2023;13(10):1243. <https://doi.org/10.3390/min13101243>.
18. Henley K.J., Clarke N.C., Sauter P. Evaluation of a diagnostic leaching technique for gold in native gold and gold \pm silver tellurides. *Minerals Engineering*. 2001;14(1):1-12. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(00\)00156-4](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(00)00156-4).
19. Celep O., Alp I., Deveci H. Application of diagnostic leaching technique for refractory gold ores. *D.P.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 2008;16:81-90.
20. Bekpulatov Zh.M., Khudaiberdiev F.T. Studying material composition and development of processing technology for a gold-bearing ore sample from one of the Uzbekistan Republic deposits. *Innovatsionnaya nauka*. 2017;3(4):20-23. (In Russ.). EDN: YLZMAH.
21. Shumilova L.V. Refractory auriferous ore technological testing (by the example of Kokpatas deposit). *Chita State University Journal*. 2009;3:42-47. (In Russ.). EDN: KYAPVT.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бывальцев Александр Владимирович,
к.т.н.,
ведущий научный сотрудник
лаборатории гидрометаллургии
АО «Иргиредмет»,
664025, г. Иркутск, б-р Гагарина, 38, Россия
✉ torrot_2008@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0001-4659-6490>

Хмельницкая Ольга Давыдовна,
к.т.н.,
ведущий научный сотрудник
лаборатории гидрометаллургии
АО «Иргиредмет»,
664025, г. Иркутск, б-р Гагарина, 38, Россия
✉ hod@irgiredmet.ru

Войлошников Григорий Иванович,
д.т.н., профессор,
заместитель генерального директора по
научно-методической и инновационной деятельности
АО «Иргиредмет»,
664025, г. Иркутск, б-р Гагарина, 38, Россия
✉ greg@irgiredmet.ru

Богородский Евгений Владимирович,
к.т.н.,
заведующий лабораторией гидрометаллургии
АО «Иргиредмет»,
664025, г. Иркутск, б-р Гагарина, 38, Россия
✉ bogorodskiy@irgiredmet.ru

Гончарук Максим Андреевич,
инженер лаборатории гидрометаллургии
АО «Иргиредмет»,
664025, г. Иркутск, б-р Гагарина, 38, Россия;
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
✉ maksimgoncharuk0708@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0008-4624-8980>

Заявленный 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 28.05.2025 г.; одобрена
после рецензирования 26.07.2025 г.; принятая к
публикации 01.09.2025 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander V. Byvaltsev,
Cand. Sci. (Eng.),
Leading Researcher of the
Hydrometallurgy Laboratory,
Irgiredmet JSC,
38, Gagarin Boulevard, Irkutsk, Russia
✉ torrot_2008@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0001-4659-6490>

Olga D. Khmelnitskaya,
Cand. Sci. (Eng.),
Leading Researcher of the
Hydrometallurgy Laboratory,
Irgiredmet JSC,
38, Gagarin Boulevard, Irkutsk, Russia
✉ hod@irgiredmet.ru

Grigoriy I. Voiloshnikov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Deputy General Director for Science,
Methodology and Innovations,
Irgiredmet JSC,
38, Gagarin Boulevard, Irkutsk, Russia
✉ greg@irgiredmet.ru

Evgeniy V. Bogorodskiy,
Cand. Sci. (Eng.),
Head of the Hydrometallurgy Laboratory,
Irgiredmet JSC,
38, Gagarin Boulevard, Irkutsk, Russia
✉ bogorodskiy@irgiredmet.ru

Maksim A. Goncharuk,
Engineer of the Hydrometallurgy Laboratory,
Irgiredmet JSC,
38, Gagarin Boulevard, Irkutsk, Russia;
Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
✉ maksimgoncharuk0708@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0008-4624-8980>

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 28.05.202; approved
after reviewing 26.07.2025; accepted for publication
01.09.2025.