

ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ЛИГНОСУЛЬФОНАТА НАТРИЯ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ УГЛЕРОДИСТЫХ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ КОНЦЕНТРАТОВ



Санакулов К.,
Председатель правления – генеральный директор АО «НГМК», д.т.н., профессор



Эргашев У.А.,
Заместитель начальника технологического отдела АО «НГМК, д.т.н., профессор



Чулиев Г.Ф.,
Директор Гидрометаллургического завода №5 АО «НГМК, PhD



Кароматов С.С.,
Главный инженер Гидрометаллургического завода №5 АО «НГМК»



Фармонов И.Э.,
Заместитель начальника лаборатории Гидрометаллургического завода №5 АО «НГМК»

Аннотация. В настоящее время мировая золотодобывающая промышленность сталкивается с объективными технологическими вызовами, обусловленными истощением запасов легкообогащаемых окисленных золотосодержащих руд и возрастающей долей упорного минерального сырья. Существенную сложность переработки представляют структурная и вещественная неоднородность золота, его присутствие в ультрадисперсной и наноразмерной форме ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$), а также тесная ассоциация частиц золота с сульфидной матрицей и углеродсодержащими компонентами руд. Наличие природного активного углерода приводит к эффекту «preg-robbling», снижая извлечение золота при традиционном цианировании. Указанные факторы обуславливают необходимость вовлечения в переработку руд двойной и тройной упорности с разработкой специализированных, научно обоснованных технологических решений.

В данной статье рассматриваются технологические проблемы извлечения золота из руд двойной упорности месторождения Ауминзо-Амантой, характеризующихся сложным минеральным составом и высокой степенью инкапсуляции благородного металла. Проанализированы результаты экспериментальных и опытно-промышленных исследований, направленных на повышение степени вскрытия золота и снижение негативного влияния углеродистых и сульфидных фаз. Особое внимание уделено применению предварительных методов окислительной подготовки сырья, включая биохимическое и термическое воздействие, а также комбинированных схем переработки. Показано, что внедрение комплексных технологий позволяет существенно повысить извлечение золота и создать предпосылки для промышленного освоения упорных руд месторождения при приемлемых технико-экономических показателях.

Ключевые слова: упорное золото, углеродистое вещество, прег-роббинг, сорбционная активность, сорбционное цианирование, обжиг, свободное золото, капсулирование, лигносульфонат натрия, извлечение.

UGLERODLI OLTIN SAQLAGAN KONSENTRATLARNI QAYTA ISHLASHDA NATRIY LIGNOSULFONATINING SANOATDA QO‘LLANILISHI

K. Sanakulov, U.A. Ergashev, S.S. Karomatov, F.G. Chuliyev, I.E. Farmonov

"Navoiy kon-metallurgiya kombinati" AJ, O'zbekiston Respublikasi

Annotatsiya. Hozirgi vaqtda jahon oltin qazib olish sanoati oson boyitiladigan oksidlangan oltin tarkibli rudalar zaxiralarining kamayib borishi hamda murakkab tarkibli (qiyin boyitiladigan) mineral xomashyo ulushining ortishi bilan bog'liq obyektiv texnologik muammolarga duch kelmoqda. Oltinni qayta ishlashda uning strukturaviy va moddiy jihatdan notekis taqsimlanganligi, ultradispers va nanoo'lchamli shaklda ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) uchrashi, shuningdek, oltin zarralarining sulfidli mineral matritsa va uglerodli komponentlar bilan zich bog'langanligi jarayonni murakkablashtiradi. Tabiiy faol uglerodning mavjudligi an'anaviy sianlash jarayonida oltinning ajralib chiqishini kamaytiruvchi "preg-robbing" effektini yuzaga keltiradi. Mazkur omillar ikki va uch karra murakkab tarkibli rudalarni qayta ishlashga jalb etish hamda ularni qayta ishlash uchun maxsus, ilmiy asoslangan samarali texnologiyalarni yaratish zaruratini belgilaydi.

Ushbu maqolada murakkab mineral tarkibga ega va qimmatbaho metallning yuqori darajada inkapsulyatsiyalanganligi bilan tavsiflanadigan Auminzo-Amantoy konining ikki karra murakkab rudalaridan oltin ajratib olishda yuzaga keladigan texnologik muammolar ko'rib chiqilgan. Oltinni ochilish darajasini oshirish va uglerodli hamda sulfidli fazalarning salbiy ta'sirini kamaytirishga qaratilgan laboratoriya va tajriba-sanoat tadqiqotlari natijalari tahlil qilingan. Xomashyoni oldindan oksidlovchi tayyorlash usullarini, jumladan biokimyoviy va termik ishlov berishni, shuningdek, kombinatsiyalashgan qayta ishlash sxemalarini qo'llashga alohida e'tibor qaratilgan. Kompleks texnologiyalarni joriy etish oltin ajralishini sezilarli darajada oshirish hamda konning murakkab tarkibli rudalarini maqbul texnik-iqtisodiy ko'rsatkichlar asosida sanoat miqyosida o'zlashtirish uchun zarur shart-sharoitlarni yaratishi ko'rsatilgan.

Kalit so'zlar: qiyin boyitiladigan oltin, uglerodli modda, preg-robbing, sorbsiya faolligi, sorbsion sianlash, kuydirish, erkin oltin, inkapsulyatsiya, natriy lignosulfonati, ajratib olish.

INDUSTRIAL APPLICATION OF SODIUM LIGNOSULFONATE IN THE PROCESSING OF CARBONACEOUS GOLD-BEARING CONCENTRATES

K. Sanakulov, U.A. Ergashev, S.S. Karomatov, F.G. Chuliev, I.E. Farmonov

"Navoiy Mining and Metallurgical Company" JSC, Republic of Uzbekistan

Abstract. At present, the global gold mining industry is facing objective technological challenges caused by the depletion of reserves of easily beneficiated oxidized gold-bearing ores and the increasing proportion of refractory mineral raw materials. Significant processing difficulties arise from the structural and mineralogical heterogeneity of gold, its occurrence in ultrafine and nanoscale forms ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$), as well as the close association of gold particles with sulfide mineral matrices and carbonaceous components of ores. The presence of naturally occurring active carbon leads to the so-called "preg-robbing" effect, which reduces gold recovery during conventional cyanidation. These factors necessitate the involvement of double- and triple-refractory ores in processing and the development of specialized, scientifically grounded technological solutions.

This paper examines the technological challenges associated with gold extraction from double-refractory ores of the Auminzo-Amantoy deposit, which are characterized by a complex mineral composition and a high degree of noble metal encapsulation. The results of experimental and pilot-scale studies aimed at increasing the degree of gold liberation and reducing the adverse effects of carbonaceous and sulfide phases are analyzed. Particular attention is paid to the application of preliminary oxidative pretreatment methods, including biochemical and thermal treatments, as well as combined processing flowsheets. It is shown that the implementation of integrated technologies can significantly enhance gold recovery and create favorable conditions for the industrial development of refractory ores of the deposit with acceptable techno-economic performance.

Keywords: refractory gold, carbonaceous matter, preg-robbing, sorption activity, carbon-in-leach (sorption cyanidation), roasting, free gold, encapsulation, sodium lignosulfonate, recovery.

Введение

Проблема переработки углеродистых сульфидных упорных золотосодержащих руд остаётся одной из наиболее сложных задач современной гидрометаллургии [1,2].

В рудах данного типа основная часть золота находится в тонкодисперсной форме, будучи инкапсулирована в сульфидных минералах либо ассоциирована с углеродистыми компонентами.

Ключевой трудностью является наличие в этих рудах углеродистых веществ (УВ), обладающих высокой сорбционной активностью.

Данное обстоятельство обуславливает явление прег-роббинга (preg-robbing): золото, перешедшее в раствор в процессе цианирования, повторно сорбируется углистым материалом, что в конечном итоге резко снижает степень его извлечения из руды.

Для преодоления влияния прег-роббинга в мировой практике были испытаны различные подходы: интенсивное цианирование с быстрым отделением раствора, использование синтетических сорбентов, применение флотационных масел, керосина и других поверхностно-активных веществ для пассивации углерода, высоко-

котемпературное цианирование, обработка сернистыми щелочами и другие. На ряде предприятий отмечены положительные результаты от применения этих методов, однако многие из них имеют существенные технологические ограничения: повышение расхода реагентов, сложности санитарной очистки, риск гидрофобизации золотосодержащих частиц и неблагоприятное влияние на оборудование.

Материалы и методики исследования

Руда месторождения «Ауминзо-Амантай», выбранная для данной работы, также относится к углеродистым сульфидным упорным золотосодержащим рудам. Согласно результатам рационального анализа, в концентратах, полученных при обогащении этих руд, содержание свободно цианируемого золота составляет 50–52 % (таблица 1).

Таблица 1

Результаты рационального анализа на золото флотоконцентрата руды Ауминзо-Амантайского рудного поля (крупность 94 % класса - 0,071мм)

Формы нахождения золота и характер его ассоциации с рудными и породообразующими компонентами	г/т	%
Свободное и в виде сростков с рудными и породообразующими компонентами (извлекаемое цианированием)	11,9	52,0
Извлекаемое после обработки NaOH (покрытое плёнками, ассоциированное с антимонитом и аморфным кремнезёмом)	0,36	1,6
Извлекаемое после обработки соляной кислотой (ассоциированное с оксидами, гидроксидами железа, хлоритами, карбонатами и пр.)	1,14	5,0
Извлекаемое после обработки азотной кислотой (ассоциированное с сульфидами)	3,33	14,7
Извлекаемое после окислительного обжига при $t=650^{\circ}\text{C}$ (ассоциированное с углеродистым веществом)	2,37	10,1
Тонковкрапленное в породообразующие минералы	3,81	16,6
Итого в исходной пробе по балансу:	22,9	100,0

Несмотря на это, извлечение золота при прямом сорбционном цианировании составляет не более 25–30 %. Основной причиной низкого извлечения является высокое содержание органического углерода (Сорг) во флотоконцентрате — 3,0–5,0 %.

Результаты исследований и их обсуждение

Сорбционная активность концентратов Ауминзо-Амантай, определённая по методике ИРГИРЕДМЕТ, составляет 90–95 % (таблица 2).

Таблица 2

Результаты сорбционной активности флотоконцентрата

Наименование пробы	R	C	n	m	Сорбционная активность, %
Флотоконцентрат (без сорбента)	3,1	0,23	26,0	22,30	91,6
Флотоконцентрат (в присутствии сорбента)		-		17,50	

$$A = \left(1 - \frac{R \cdot C}{n - m} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

R – отношение Ж:Т в пульпе

C – концентрация золота в растворе прямого цианирования, мг/л

n – содержание золота в исходном материале г/т

m – содержание золота в кеках сорбционного цианирования г/т.

Условия определения сорбционной активности флотоконцентрата: концентрация NaCN – 2000 мг/л; продолжительность – 24 ч; pH–10,5–11,0; Т:Ж=1:3;1; загрузка смолы – 10,0%;

При проведении сорбционного цианирования огарков, полученных в результате обжига флото-концентратов данных руд, степень извлечения золота составляет не более 70–75 %. Для выяснения причин столь низкого извлечения золота из огарков были проведены микроскопические исследования с использованием сканирующего электронного микроскопа Arpeo 2 SEM

(рисунок 1).

В результате микроскопического анализа определено, что основная масса свободного золота представлена частицами nano размеров, которые легко подвергаются капсулированию при обжиге.

Таким образом, при обжиге наряду с вскрытием упорного золота часть свободного золота nano размеров одновременно легко подвергается капсулированию.

Для достижения высоких показателей извлечения свободного золота его необходимо извлечь до обжига, оставляя обжиг только для вскрытия упорного золота.

Однако для извлечения свободного золота методом сорбционного цианирования необходимо исключить эффект прегорбинга. Технологии пассивации углеродистых минералов с использованием органических реагентов и поверхностно-активных веществ привлекают особое внимание. Опыт ранее проведенных работ показывает, что обработка руды или концентрата такими реагентами позволяет существенно снизить сорбционную активность углеродистого вещества и уменьшить потери золота с хвостами

цианирования [3-6].

На наш взгляд, одним из перспективных направлений в этой области может стать предварительная обработка углеродистых концентратов для пассивации УВ перед сорбционным цианированием. Для подтверждения этих предположений нами был проведен комплекс целевых лабораторных исследований и полупромышленных испытаний, включающий подбор реагентов и изучения процесса обработки углеродистого золотосодержащего кон-

центрата с последующим извлечением золота методом цианирования.

Результаты лабораторных и полупромышленных испытаний подтвердили, что предварительная обработка углеродистых упорных флотоконцентратов с использованием лигносульфоната натрия способствует повышению степени извлечения золота на 3–10 % (таблица 3 и 4).

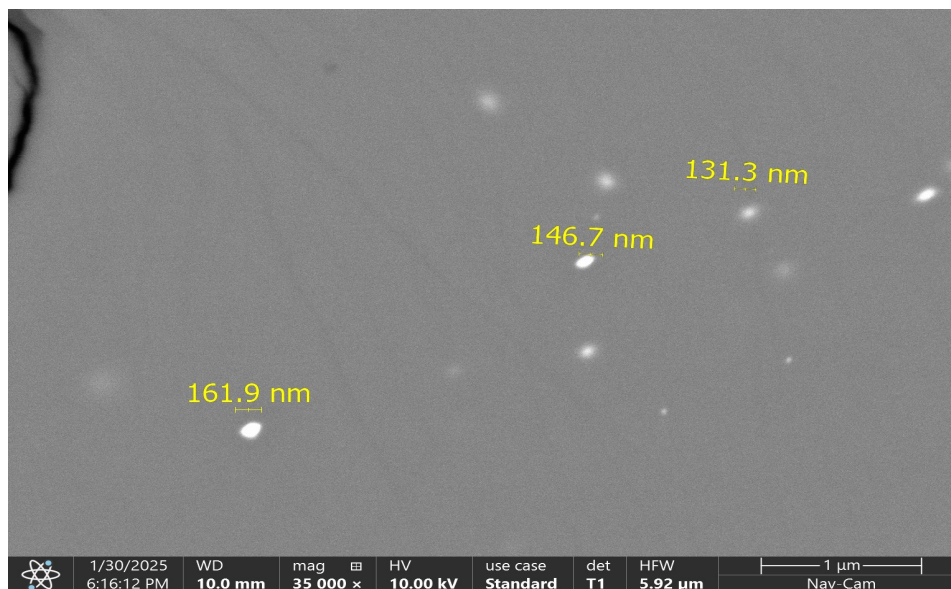


Рис. 1. Микроскопический анализ огарка

Таблица 3

Результаты лабораторных испытаний по определению влияния натрия лигносульфоната на сорбционное цианирование флотоконцентрата

Время сорбц. цианирования, час	Флотоконцентрат					Флотоконцентрат + 10 кг/т лигносульфонат натрия				
	Содержание Au, г/т		Изв-е Au, %	Содержание Au		Содержание Au, г/т		Изв-е Au, %	Содержание Au	
	Исх	Хвост		в ж. ф. мг/л	в смоле мг/г	Исх	Хвост		в ж. ф. мг/л	в смоле мг/г
3	21,0	15,1	28,1	0,02	0,11	21,0	13,1	37,6	0,02	0,11
6	21,0	13,8	34,3	0,01	0,12	21,0	12,7	39,5	0,01	0,11
12	21,0	13,2	37,1	0,01	0,10	21,0	12,5	40,5	0,01	0,10
18	21,0	13,5	35,7	0,01	0,10	21,0	12,7	39,5	0,01	0,10

Согласно полученным данным необходимое время сорбционного выщелачивания исходного продукта составляет 12 часов. Добавление лигносульфоната натрия из расчета 10 кг/т, повышает извлечение золота и снижает необходимое время сорбционного выщелачивания.

Для подтверждения лабораторных результатов были проведены полупромышленные испытания, включающие обработку флотоконцентрата лигносульфонатом натрия, предварительное

сорбционное цианирование, а также окислительный обжиг хвостов сорбционного цианирования.

Полученный огарок из вращающейся трубчатой печи ВГТП-8,5 подвергали сорбционному цианированию в ёмкости объёмом 1 мЗ, затем проводили горячую щелочную обработку хвостов сорбционного цианирования огарка. Результаты полупромышленных испытаний представлены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты полупромышленных испытаний по определению влияния натрия лингосульфоната на сорбционное цианирование флотоконцентрата

№	Наименование	Исходные данные			Результаты предварительного сорбционного цианирования			Результаты предварительного сорбционного цианирования		
		Au, г/т	Ss, %	C _{org} , %	До Au, г/т	После Au, г/т	Изв-е, %	Au, г/т	Ss, %	C _{org} , %
1	Флотоконцентрат без обработки	21,3	22,15	3,65	21,30	14,25	33,10	17,10	0,10	0,16
2	Флотоконцентрат, обработанный лигно-сульфонатом натрия (расход — 10 кг/т)					12,60	40,85	15,50	0,08	0,12
№	Наименование	Результаты сорбционного цианирования огарка			Результаты горячей щелочной обработки хвостов сорбционного цианирования огарка			Суммарное извлечение из флотоконцентрата, %		
		До Au, г/т	После Au, г/т	Изв-е, %	До Au, г/т	После Au, г/т	Изв-е %			
3	Хвосты предварительной сорбции без обработки	17,10	7,15	58,19	7,15	5,40	24,48	78,87		
4	Хвосты предварительной сорбции, обработанные лигносульфонатом натрия	15,50	5,20	66,45	5,20	3,25	37,50	87,60		

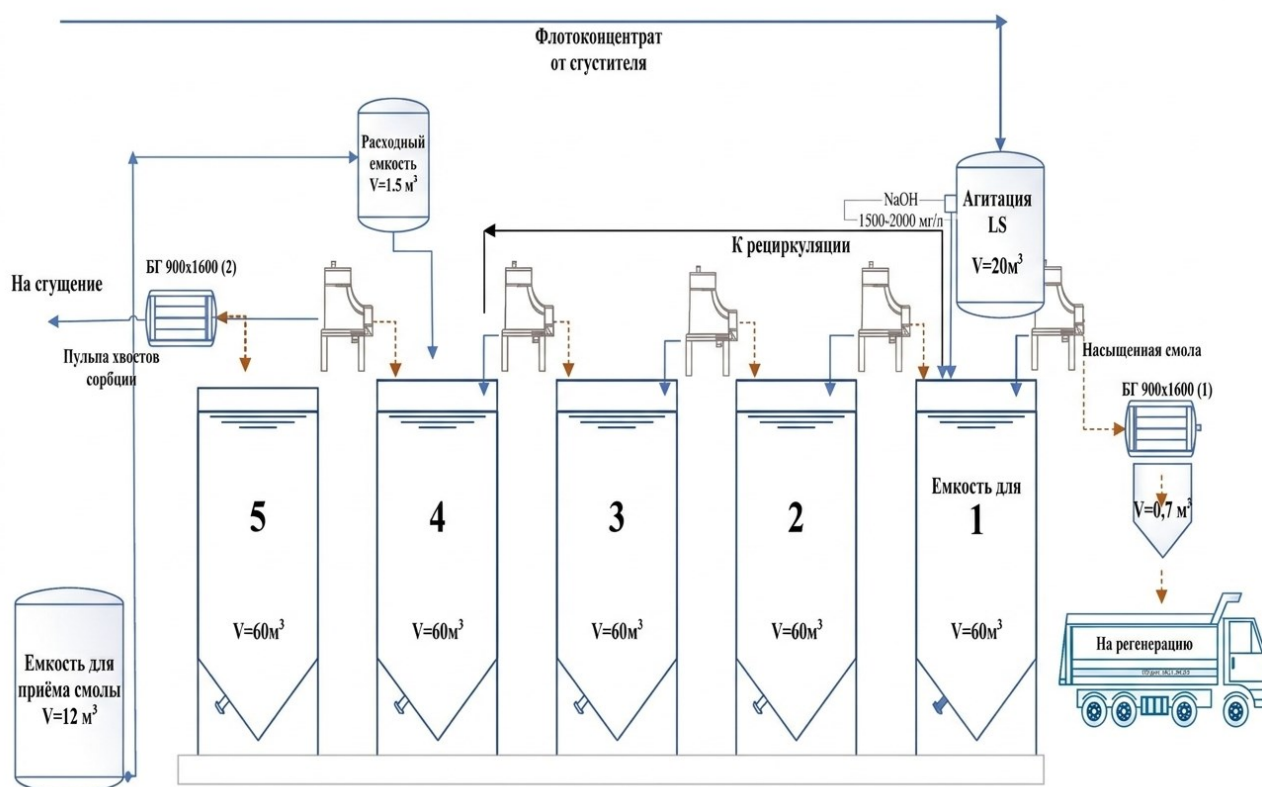


Рис. 2. Промышленная установка предварительного сорбционного цианирования с применением лингосульфоната натрия

На основе этих результатов, при переработки углеродистых упорных флотоконцентратов месторождения «Ауминзо-Амантай» для извлечения свободного золота до процесса обжига в НГМК создана промышленная установка предварительного сорбционно-го цианирования (рисунок 2).

Описание технологической схемы предварительной сорбции: Со сгустителя сгущенный флотоконцентрат откачивается центробежными насосами в контактный чан ($V=20\text{ м}^3$). Для пассивации сорбционной активности органического углерода в контактный чан подаётся раствор — лигносульфонат натрия (LS) с концентрацией 10 %.

Для перевода драгоценных металлов с твёрдой фазы в жидкую фазу в щелевик-пульпаделитель подаётся цианистый натрий с концентрацией 1500–2000 мг/л. В качестве сорбента применяется ионообменная смола марки D-301G. Движение смолы и пульпы флотоконцентрата осуществляется с помощью аэролифтов.

Свежий или отрегенированный (обеззолоченный) сорбент загружается в приемную емкость ($V = 12\text{ м}^3$), откуда аэролифтом подается в расходный бункер ($V = 1,5\text{ м}^3$). Из расходного бункера смола через дозирующее устройство поступает в сорбционные

пачуки №4 и №5.

Далее ионообменная смола движется противотоком к движению пульпы в сторону первого сорбционного пачука. Насыщенная смола самотеком поступает на барабанный грохот (БГ-900х1600 [1]). Насыщенный сорбент с барабанного грохота направляется в бункер ($V = 9,7\text{ м}^3$) для отмывки от илов. После отмывки насыщенная смола направляется на регенерацию.

Заключение

Проведённые исследования показали, что основной причиной низкого извлечения золота из углеродистых упорных флотоконцентратов месторождения Ауминзо-Амантай является высокая сорбционная активность углеродистого вещества, вызывающая эффект прег-роббинга.

Установлено, что предварительная обработка концентрата лигносульфонатом натрия способствует пассивации углеродистых минералов и повышает эффективность сорбционного цианирования. Запуск в работу данной промышленной установки с обработкой флотоконцентрата лигносульфонатом натрия позволил пассивировать углеродные минералы и повысить сквозное извлечение золота из руды с 71,0-72,0 % до 80,0 %

Библиографический список

1. Санакулов, К., & Хамраев, И. (2025). Геолого-геохимические и технологические аспекты золота Кызылкумов. Навои, Узбекистан. 725 с.
2. Санакулов, К., & Эргашев, У. А. (2014). Теория и практика освоения переработки золотосодержащих упорных руд Кызылкумов. Ташкент, Узбекистан: ГП «НИИМП». 297 с.
3. Кароматов, С. С., Чулиев, Ф. Г., & Хамидов, Р. А. (2024). Влияние лигносульфоната натрия на прег-роббинг при сорбционном цианировании. *Universum: Технические науки*, 7(124), 6–11.
4. Санакулов, К., Чулиев, Ф. Г., & Кароматов, С. С. (2025). Изучение влияния лигносульфоната натрия на извлечение золота из флотационного концентрата месторождения «Аджибугут». В *Трудах VI Международной научно-технической конференции «Комплексное инновационное развитие Зарафшанского региона: достижения, проблемы и перспективы»* (с. 6–7). Навои, Узбекистан, 24–25 сентября.
5. Rees, K. L., & van Deventer, J. S. J. (2000). Preg-robbing phenomena in the cyanidation of sulphide gold ores. *Hydrometallurgy*, 58(1), 61–80. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00123-4](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00123-4)
6. Федюкевич, В. А., Кубышкин, С. А., Блохин, А. А., Сухаржевский, С. М., & Воробьев-Десятковский, Н. В. (2015). Использование ионообменных смол для борьбы с явлением прег-роббинга золота в процессе цианидного выщелачивания. *Журнал прикладной химии*, 88(2), 246–254.