

УДК 662.7:544.723

DOI 10.17513/use.38432

РОЛЬ СОРБЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПЕРЕРАБОТКЕ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Малышев Е.О., Белова Т.П., Хижко З.И.

*Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения
Российской академии наук, Петропавловск-Камчатский, e-mail: egormalyshev1900@bk.ru*

Высокий спрос на золото в промышленности заставляет искать альтернативные источники извлечения данного металла. Целью настоящей работы является обзор сорбционных методов, применяемых при переработке золотосодержащих руд и при хранении хвостов обогащения. Проведен анализ русскоязычных и англоязычных научных публикаций, вышедших с 2010 г. по настоящее время, по теме сорбции мелкого и тонкого золота. Исследование охватило материалы различных издательств: «Горная книга», Elsevier, Издательский дом «Академия Естественных наук», Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry. Также рассмотрены доклады российских научных конференций и документация запатентованных технологий. Из более 70 изученных источников для детального анализа было отобрано 25 наиболее релевантных работ как на русском, так и на английском языках. Так как для извлечения мелкодисперсного золота из промышленного продукта методы гравитационного и флотационного обогащения малоэффективны, вместо этого часто применяется метод цианирования с последующей сорбцией золота, чтобы повысить эффективность процесса. На основании выполненного литературного обзора и собственных исследований установлено, что в настоящее время ведутся работы по разработке следующих видов сорбентов: ионообменные смолы, активные угли, природные органические и природные минеральные сорбенты. Для улучшения сорбционных свойств и адаптации сорбционных материалов к растворам различного состава применяют физико-химическую модификацию существующих сорбционных материалов. Сделан вывод о целесообразности дальнейшего изучения вопроса сорбции золота и создания новых технологий, чтобы сделать процесс извлечения золота более эффективным.

Ключевые слова: сорбция, цианирование, золото, сорбент, извлечение, выщелачивание, сорбционная емкость, смолы, цеолиты

THE ROLE OF SORPTION TECHNOLOGIES IN THE PROCESSING OF GOLD-BEARING MINERAL RAW MATERIALS

Malyshev E.O., Belova T.P., Khizhko Z.I.

*Research Geotechnological Center Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatsky, e-mail: egormalyshev1900@bk.ru*

High demand for gold in industry is driving the search for alternative sources of extraction of this metal. The aim of this work is to review sorption methods used in the processing of gold-bearing ores and in the storage of tailings. An analysis of Russian- and English-language scientific publications on the sorption of fine and thin gold published from 2010 to the present has been conducted. The study covered materials from various publishers: Gornaya Kniga, Elsevier, Publishing House "Academy of Natural Sciences," Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry. Reports from Russian scientific conferences and documentation of patented technologies were also reviewed. From more than 70 sources studied, 25 of the most relevant works in both Russian and English were selected for detailed analysis. Since gravity and flotation methods are not very effective for extracting fine-grained gold from industrial products, cyanidation followed by gold sorption is often used instead to increase the efficiency of the process. Based on a review of the literature and our own research, it has been established that work is currently underway to develop the following types of sorbents: ion exchange resins, activated carbons, natural organic and natural mineral sorbents. To improve the sorption properties and adapt sorption materials to solutions of various compositions, physicochemical modification of existing sorption materials is used. It has been concluded that it is advisable to further study the issue of gold sorption and create new technologies to make the gold extraction process more efficient.

Keywords: sorption, cyanidation, gold, sorbent, extraction, leaching, sorption tank, resins, zeolites

Введение

Золото имеет огромный спрос в современном мире: ювелирные изделия, инвестиции и финансы, медицина, космическая отрасль, электроника. В условиях стремительного развития технологий и расширения производственных мощностей спрос на золото постоянно растет. В настоящее время около трети всего добываемого золота приходится на переработку отходов производства. Эффективность использования гидрометаллургических методов из-

влечения мелкого и тонкодисперсного золота из промпродукта и лежалых хвостов широко обсуждается в научной литературе [1]. Одной из основных технологий данного метода является цианирование. Известно, что кроме целевых металлов, золота и серебра, цианидные комплексы образуют цветные металлы, такие как медь, никель, цинк. В результате кеки выщелачивания представляют большую угрозу окружающей среде в долгосрочной перспективе, так как под действием атмосферных факторов

происходит миграция токсичных элементов и их соединений по гидрологической сети, нанося серьезный вред гидробионтам [2; 3]. Для Камчатского края это является особенно важным, так как большинство рек и озер имеют статус нерестовых водоемов. Сорбционное доизвлечение целевых металлов, золота и серебра позволит повысить выход целевого продукта, а очистка сточных вод, формирующихся вокруг хвостохранилищ, позволит предотвратить загрязнение окружающих водоемов токсичными металлами.

Целью настоящей работы является обзор сорбционных методов, применяемых при переработке золотосодержащих руд и при хранении хвостов обогащения.

Материалы и методы исследования

Проведен анализ русскоязычных и англоязычных научных публикаций, вышедших с 2010 г. по настоящее время (посвященных сорбции мелкого и тонкого золота), таких издательств, как «Горная книга», Elsevier, Издательский дом «Академия Естествознания», Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry, материалов российских конференций, а также запатентованных технологий. В результате было проанализировано более 70 источников и отобрано для анализа и обработки 25 источников.

Результаты исследования и их осуждение

Классификация сорбентов, используемых в золотодобывающей отрасли. Поскольку гравитационное и флотационное обогащения являются недостаточно эффективными методами для извлечения мелкого и тонкодисперсного золота из промпродукта, используют различные методы цианирования. Из растворов цианидного выщелачивания золота извлекают сорбцией, используя продуктивные растворы либо после отделения кека выщелачивания, либо методом сорбент в пульпе. Применяемые сорбенты – это ионообменные смолы, активные угли, минеральные сорбенты, органические полимеры природного происхождения, исходные или модифицированные.

Ионообменные смолы. В работе сотрудников Института горного дела ДВО РАН показано [4], что активационное цианидное выщелачивание золота с агитацией и двухстадийной сорбцией ионообменной смолой более чем на 4% (выход 89,82%) эффективнее контрольного выщелачивания с агитацией (85,65%) и на 2% эффективнее выщелачивания с механоактивацией (87,82%).

При применении сильноосновного анионита Amberjet™ 4400 для извлечения золота(I) из цианистых растворов достигается максимальная емкость 427,771 мг/г [5]. Сравнение анионообменных смол, содержащих четвертичные аммониевые основания МТА 5011 и Amberjet 4200, проведено Azizitorghabeh A. с соавторами [6]. Выяснилось, что при соотношении смолы и раствора 100 г/л, температуре 25°C, pH = 2,0 и 24 часах встряхивания максимальное извлечение золота 99% и минимальное извлечение меди 12% показала смола МТА 5011. Сорбционные испытания по извлечению золота из многокомпонентных растворов с применением анионита АМ-2Б проведены Kaumetova D.S. и др. [7]. Исследования скорости сорбции в статических условиях проводили в зависимости от температуры, присутствия примесей в растворе и концентрации золота. По результатам анализа было установлено, что главным фактором качественного и количественного разделения золота и примесных металлов является концентрация цианидных и гидроксильных ионов в растворе. Лабораторные и опытно-промышленные испытания ионита PuroGold в сравнении с ионитом АМ-2Б для сорбции золота из растворов кучного выщелачивания показали, что средняя емкость сорбента АМ-2Б по золоту через 72 ч равна 1,77 мг/г, тогда как у сорбента PuroGold средняя емкость составляет 0,97 мг/г. Также сорбент PuroGold требует меньше времени на регенерацию и имеет высокую скорость пропускания растворов. Применение сорбента ионита PuroGold позволит сократить затраты на строительство цеха регенерации 8,5 раз и в 5 раз годовые затраты на регенерацию. Авторы рекомендуют к применению ионит типа PuroGold, но только после его доработки (механическая прочность должна быть не менее 96% и емкость по золоту не менее 70% от емкости сорбента АМ-2Б) [8].

Уникальными свойствами обладает слабокислотный анионит, полученный введением карбоксильных групп обработкой полимерной матрицы натриевой солью монохлоруксусной кислоты (в мольном отношении 0,05–0,15). В качестве полимерной матрицы предложено использовать сополимер акрилонитрила, дивинилбензола, стирола и этилстирола. Десорбция золота из насыщенного ионита увеличивается до 97–99%, объем десорбирующего раствора снижается в 10 раз [9]. Получен сорбент, содержащий краун-эфир на носителе, для

сорбции золота из солянокислых растворов с концентрацией 0,1-0,3 моль/л соляной кислоты. В зависимости от задач извлечения могут использоваться носители различной природы: это могут быть полимерные материалы, такие как стирол-дивинилбензолные, акрилатные и т. п. неорганические вещества, например силикагель, а также композитные структуры, к примеру SiO_2 -P. Данный носитель обрабатывают раствором бензо-15-краун-5 в хлороформе или метаноле, в качестве разбавителя можно использовать нитробензол, отгонку растворителя и сушку сорбента. По результатам экспериментов выявлено, что сорбенты без разбавителя лучше сорбируют золото из 3 М солянокислых растворов. Сорбент, с содержанием 30% Б15К5, извлекает более 90% золота [10].

Активные угли. Экспериментально доказано влияние кислотной обработки и реактивации угля марки GOLGCARB 207C 6X12 на сорбционные свойства. Угли после технологических операций стали прочнее: механическая прочность составляет 95% после десорбции, кислотной обработки и реактивации; 96% после десорбции и кислотной обработки, тогда как у свежего, неиспользованного ранее в процессе угля механическая прочность составила 85%. Путем частичной замены извести на NaOH удалось уменьшить содержание ионов кальция в растворах. Также повысилась константа скорости адсорбции с 547 ч^{-1} до 673 ч^{-1} , что увеличило извлечение из жидкой фазы с 63 до 64%. Авторы рекомендуют контролировать значения pH при процессе кислотной обработки ($\text{pH} = 1,0-2,0$), проведение кислотной обработки после десорбции, а не до операции, замену HCl на H_2SO_4 и извести на NaOH [11]. Повышение сорбционной емкости сорбента по золоту на 26,4% может быть достигнуто за счет неравномерной загрузки активного угля в сорбционные колонны – от меньшей к большей навстречу потоку раствора [12].

Доказано эффективное извлечение целевого компонента из золотосодержащего сырья при кучном, кюветном и чановом выщелачивании с использованием угольного сорбента с последующим озоленим. Предварительное подкисление хлорной воды, для растворения хлора, путем подачи HCl, приводит к созданию кислой среды ($\text{pH} 2,5-3,0$). Благодаря формированию кислой среды до растворения хлора, происходит подавление реакции гидролиза и формируется мощный окислитель – хлорноватистая кислота (HClO). В результате эффективность

извлечения золота в продуктивный раствор возрастает до 76,9%, т. к. хлор и хлорноватистая кислота активно взаимодействуют с частицами золота в золотосодержащем массиве [13].

Исследования Нургабыл Н.К. и Мамырбаевой К.К. показали, что среди применяемых сорбентов, таких как NoritRO, АКВАСОРБ и шунгитовый сорбент, наивысшая сорбционная емкость наблюдается у ионита NoritRO (0,88 мг/г). Оптимальный уровень pH для эффективного извлечения золота при использовании NoritRO и АКВАСОРБ составляет 10, тогда как для шунгитового сорбента этот показатель равен 6. В процессе извлечения золота из многокомпонентного раствора, с использованием NoritRO, также происходит соизвлечение примесей металлов. Использование сорбента NoritRO в шестиступенчатом процессе обеспечивает высокоэффективное извлечение золота из цианистого продуктивного раствора, достигая показателей 96–99% [14].

Используя пористый активированный уголь Norit ROX 0.8, удалось извлечь ионы AuCl_4^- из кислого хлоридного раствора через механизм необратимой адсорбции. Во время этого процесса ионы золота восстанавливались благодаря взаимодействию с фенольными гидроксидными группами на поверхности угля. Осаждение золота наблюдалось преимущественно на поверхности гранул, хотя внутри пор угля металлические частицы оказались равномерно распределенными. Кинетический анализ показал, что адсорбция следует кинетике реакции первого порядка для обеих реагирующих сторон, то есть для Au(III) и активированного угля. Было установлено, что диффузия ионов золота оказывает значительное влияние на скорость сорбции, при этом основной препятствующий фактор – внутренняя диффузия. Также исследования температурных и гидродинамических условий подтвердили влияние этих параметров на процесс [15].

Специалистами института Иргиредмет проведены исследования процесса извлечения золота из активированных углей марок АГ-95, АБДК, ХМС. В фазе угольных сорбентов золото находится в виде комплексных соединений (галогенидных и тиокарбамидных). Также оценена эффективность последующей десорбции золота. Анализ результатов показал, что сорбция не зависит от pH, но мешающее влияние на скорость процесса извлечения золота оказывают хлор и бром. Присутствие тио-

карбамида существенно ухудшает процесс сорбции золота и серебра, что приводит к многократному уменьшению эффективности их извлечения. Кроме того, было обнаружено, что температура также негативно влияет на сорбционные свойства тиокарбамидных комплексов. При использовании активированного угля, пропитанного в растворах галогенидов, для десорбции золота рекомендуется применять растворы цианида натрия, тиосульфата натрия и ацетонитрила, имеющие щелочную среду. После элюирования активный уголь показывает высокую способность к сорбции золота из последующих растворов, сохраняя относительно высокую ёмкость [16].

Природные органические материалы. По результатам экспериментов было доказано, что превосходные характеристики имеет сорбент, синтезированный из фурфурольных сополимеров. Синтезирование фурфурола осуществлялось путем кипячения с серной кислотой растительных сельскохозяйственных отходов (стебли подсолнечника, соломы, отрубей) и древесного сырья. В процессах извлечения и последующего выделения золота его эффективность в поглощении и высвобождении золотосодержащих соединений значительно превышает показатели других материалов [17].

Материалы, содержащие целлюлозу, хлопковую целлюлозу и прядильные отходы, являются эффективными сорбентами для выделения ценных элементов, включая золото, из хлоридных растворов [18]. Экспериментально установлено, что максимальной сорбционной ёмкостью по отношению к золоту обладают материалы на основе прядильных отходов: при $pH = 0$ величина сорбционной ёмкости составила 5,1 мг/г, при $pH = 1,0$ это значение снизилось до 4,8 мг/г.

Сорбент на основе хитозана [19; 20] (панцири крабов, креветок, омаров и т.д.) с добавлением азелаиновой кислоты способен сорбировать золото. Сорбция золота при концентрации 1 мг/л составляет более 70%. Равновесное состояние достигается через 30–60 минут, что значительно быстрее по сравнению с другими сорбентами. Благодаря высокой степени набухания можно извлекать драгоценные металлы даже из сточных вод с очень низкой концентрацией.

Минеральные сорбенты. Большую роль в сорбции золота играют минеральные сорбенты в силу их доступности и невысокой стоимости. Среди исследуемых материалов, описанных в литературе, стоит выделить смесь глинистых минералов

и гидрослюды, которая продемонстрировала наибольшие характеристики сорбционной активности (как по скорости, так и по величине) при взаимодействии с золотом. Согласно результатам анализа кривых сорбции, данная смесь способна полностью извлечь золото как из хлоридных, так и из сульфатных растворов. Вторая смесь (каолинистая глина и гуминовые кислоты) также полностью извлекает Au из сульфатных растворов, но в хлоридных растворах устанавливается равновесие между Au в растворе и сорбированным Au [21].

Как правило, минеральные сорбенты обладают относительно невысокой сорбционной ёмкостью, но наличие у них развитой поверхности позволяет провести модификацию с целью улучшения их сорбционных свойств. Например, при модификации бентонита тиомочевинной и моноэтанолмином значительно возрастает адсорбция серебра. Так, по результатам экспериментов [22] выяснилось, что бентонит, пропитанный 10%-ным водным раствором тиокарбамида, имеет наибольшую адсорбционную активность 72 мг/г, когда как у чистого образца бентонита адсорбционная активность равна 45 мг/г.

В НИГТЦ ДВО РАН проводятся экспериментальные исследования по изучению сорбционных характеристик цеолитов Ягоднинского месторождения Камчатского края (№ 1) и Середочного месторождения Хабаровского края (№ 2). Цеолит Ягоднинского месторождения Камчатского края содержит до 70% клиноптилолита, до 10% морденита, имеет довольно высокий кремнеземистый модуль $Si/Al = 5,25$ и соотношение содержания щелочноземельных металлов к сумме щелочных металлов $Ca/(Na+K) = 0,89/4,97$. Цеолит Середочного месторождения Хабаровского края состоит на 65–70% из клиноптилолита и изоструктурного ему гейландита, кремнеземистый модуль $Si/Al = 3,15$; соотношение содержания щелочноземельных металлов к сумме калия и натрия $Ca/(Na+K) = 2,86/4,10$. Была прослежена зависимость сорбции золота от pH в диапазоне от 2,0 до 10,0 ед. [23]. Выявлено оптимальное значение pH , равное 4,0, при этом сорбционная ёмкость по золоту составила 0,126 и 0,143 мг/г для цеолитов месторождений № 1 и № 2 соответственно.

При изучении кинетических характеристик сорбции использовали хлоридные растворы с содержанием золота на уровне 10 мг/л.

Таблица 1

Кинетические характеристики сорбции золота цеолитами № 1 и № 2 [24]

Образец	Степень завершенности, %	$k_1 \cdot 10^5, \text{с}^{-1}$	$k_2 \cdot 10^8, \text{г} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ммоль}^{-1}$	$D_{\text{ef}} \cdot 10^{10}, \text{см}^2/\text{с}$	
				$r = 0,025 \text{ см}$	$r = 0,0125 \text{ см}$
№ 1	65	9,2	3,8	14,7	3,7
	100	1,0		1,6	0,39
№ 2	31	3,0	1,4	9,6	2,4
	100		115	5,9	1,6

Таблица 2

Сорбция золота цеолитами месторождений № 1 и № 2, полученная в статических условиях [25]

Сорбент	Уравнение Ленгмюра				Уравнение Фрейндлиха			Модель Дубинина – Радушкевича			
	k	R_L	$\Delta G, \text{кДж/моль}$	R^2	n	$k, 10^3$	R^2	$C_0, \text{мг/л}$	$K_{\text{DR}}, \text{моль}^2/\text{кДж}^2$	$E, \text{кДж/моль}$	R^2
№ 1	112	0,160	–28,3	0,964	3,66	2,1	0,939	2–6 6–10	0,0039 0,0114	11,3 6,62	0,950 0,993
№ 2	46	0,326	–26,2	0,989	2,26	5,2	0,907	2–6 6–10	0,0062 0,0192	8,98 5,10	0,968 0,996

В таблице 1 представлены кинетические характеристики сорбции золота цеолитами различных месторождений Дальнего Востока, где a – равновесная сорбционная емкость, ммоль/г; k_1 – константа скорости сорбции модели псевдопервого порядка, 1/с; k_2 – константа скорости сорбции псевдвторого порядка, г/(ммоль·с); D_{ef} – коэффициент диффузии, рассчитанный графоаналитическим способом в зависимости от степени завершенности процесса, см²/с; r – граничные значения радиуса зерна сорбента, см. Низкие значения коэффициентов диффузии свидетельствуют о том, что процесс сорбции лимитируется внутренней диффузией.

Для описания процессов сорбции золота цеолитами № 1 и № 2 в зависимости от концентрации в диапазоне от 2,0 до 10 мг/л при соотношении Т:Ж=1:50 проводили экспериментальные исследования в статическом режиме. Для обработки полученных результатов использовали уравнения Ленгмюра, Фрейндлиха и Дубинина – Радушкевича. Расчеты по уравнению Ленгмюра позволяют оценить теоретическую максимальную сорбционную емкость A_{max} , константы адсорбционного взаимодействия, k , энергию Гиббса ΔG . По эм-

пирическому уравнению Фрейндлиха рассчитаны константы адсорбционного равновесия, зависящие от природы адсорбента и адсорбата, механизм сорбции оценен по модели Дубинина – Радушкевича.

Параметр равновесия R_L , рассчитанный исходя из параметров уравнения Ленгмюра, имеет значения меньше единицы, что позволяет сделать вывод об удовлетворительном протекании адсорбции.

Согласно модели Дубинина – Радушкевича, при содержании золота от 2 до 6 мг/л свободная энергия адсорбции E на образце № 1 равна 11,32 кДж/моль, на образце № 2 – 8,98 кДж/моль, что соответствует ионообменному механизму. При сорбции из растворов с содержанием золота от 6 до 10 мг/л свободная энергия адсорбции на образце № 1 составляет 6,62 кДж/моль, на образце № 2 – 5,1 кДж/моль, что свидетельствует о физической адсорбции, вероятно, за счет порового пространства.

Заключение

В условиях постоянно растущего спроса на золото, перехода золотоизвлекательных фабрик на переработку отходов производства и лежалых хвостов важным звеном в технологической схеме является поиск

эффективных и селективных сорбентов для концентрирования золота из растворов различного состава. На основании выполненного литературного обзора и собственных исследований установлено, что в настоящее время ведутся работы по разработке следующих видов сорбентов: ионообменные смолы, активные угли, природные органические и природные минеральные сорбенты. Для улучшения сорбционных свойств и адаптации сорбционных материалов к растворам различного состава применяют физико-химическую модификацию существующих сорбционных материалов. Ионообменные смолы и активные угли в исходном или модифицированном состоянии чаще применяют не только по методу сорбент в пульпе, но и для сорбции в сорбционных колоннах методами восходящего или нисходящего потока. Минеральные сорбенты, такие как цеолиты, рекомендуется использовать для очистки талых и дождевых стоков в местах хранения кеков выщелачивания золотоизвлекающих фабрик.

Список литературы

1. Малышев Е.О. Современные технологии извлечения мелкого и тонкого золота из лежалых хвостов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2023. № S14. С. 33–43. DOI: 10.25018/0236_14_93_2023_12_14_33. EDN: EWLUER.
2. Ершова Л.С., Белова Т.П. Перспективы использования природных цеолитов Ягоднинского месторождения Камчатского края // Естественные и технические науки. 2017. № 3 (105). С. 66–69. EDN: YJTOET.
3. Пашкевич Р.И., Белова Т.П., Таранов С.Р. Численное моделирование состава дренажных вод отвалов на месторождении «Аметистовое» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № S 2. С. 270–286. EDN: TKPAMX.
4. Лаврик А.В., Рассказова А.В., Копылова А.Е., Лаврик Н.А. Исследование способов переработки золотосодержащей руды месторождения Делькен // Проблемы недропользования. 2021. № 1 (28). С. 28–34. DOI: 10.25635/2313-1586.2021.01.028. EDN: XEAGAO.
5. Kwak I.S., Bae M.A., Won S.W., Mao J., Sheba K., Park J., Sathishkumar M., Yun Y. S. Sequential process of sorption and incineration for recovery of gold from cyanide solutions: Comparison of ion exchange resin, activated carbon and biosorbent // Chemical Engineering Journal. 2010. Vol. 165. Is. 2. P. 440–446. DOI: 10.1016/j.ces.2010.09.027.
6. Azizitorghabeh A., Mahandra H., Ramsay J., Selective gold recovery from pregnant thiocyanate leach solution using ion exchange resins // Hydrometallurgy. 2023. Vol. 218. P. 106055. DOI: 10.1016/j.hydromet.2023.106055.
7. Kaumetova D.S., Koizhanova A.K., Absalyamov Kh. K., Magomedov D.R., Banks C.E. Studies of the rate of gold sorption by the AM – 2B anionite from cyanidealkaline solutions // Комплексное использование минерального сырья. 2022. № 1 (320). P. 88–94. DOI: 10.31643/2022/6445.10. EDN: KYQPYS.
8. Дмитриенко В.П., Андросов А.А., Сидоров М.Е., Шестаев В.Ф. Сорбция золота из растворов кучного выщелачивания // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2010. Т. 53. № 8. С. 63–67. EDN: MTALED.
9. Способ получения ионита для сорбции золота: пат. 2615522 С1 Рос. Федерация: МПК B01J 41/12/ Бала-новский Н.В., Царенко Н.А., Шурмель Л.Б.; заявитель и патентообладатель Акционерное общество «Ведущий научно-исследовательский институт химической технологии». № 2016112911; заявл. 05.04.2016; опубл. 05.04.2016. EDN: ZTVOVV.
10. Способ получения сорбентов на основе бензо-15-краун-5 для извлечения золота: пат. 2699631 С2 Рос. Федерация: МПК B01J 20/32, B01J 20/22/ Выдаш А.А., Довгий И.И., Бежин Н.А.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Малое инновационное предприятие «Сорбентэкс». № 2018104788; заявл. 07.02.2018; опубл. 06.09.2019. EDN: ZQLVBV.
11. Мязин В.П., Арданаева С.А. Влияние активированного угля на эффективность сорбционного выщелачивания золотосодержащих руд (на примере обогащательной фабрики ГОКа «Кубака») // Вестник Забайкальского государственного университета. 2024. Т. 30. № 1. С. 62–72. DOI: 10.2109/2227-9245-2024-30-1-62-72 EDN: NEBDJG.
12. Способ извлечения золота из растворов сорбцией на активный уголь: пат. 2811646 С1 Рос. Федерация: МПК C22B 11/00, C22B 3/24, B01D 15/00/ Хвойнов В.Н., Елшин В.В., Миронов А.П.; заявитель и патентообладатель Акционерное общество «Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов» АО «Иргиредмет». № 2022125237; заявл. 26.09.2022; опубл. 15.01.2024. EDN: ICLCOM.
13. Способ извлечения золота из золотосодержащего сырья: п. 2794160 С1 Рос. Федерация: МПК C22B 11/00, C22B 11/06, C22B 3/12/ Морозов Ю.П., Вальцева А.И., Апакашев Р.А., Шевченко А.С.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет». № 2022121536; заявл. 09.08.2022; опубл. 12.04.2023. EDN: ODYYAR.
14. Нуртабыл Н.К., Мамырбаева К.К. Исследование сорбции золота активированным углем в присутствии металлов примесей // Горный журнал Казахстана. – 2025. № 1(237). P. 51–58. DOI: 10.48498/minmag.2025.237.1.003. EDN: CIAUZZ.
15. Wojnicki M., Luty-Błoch M., Socha R.P., Mech K., Pędzich Z., Fitzner K., Rudnik E. Kinetic studies of sorption and reduction of gold (III) chloride complex ions on activated carbon Norit ROX 0.8 // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2015. Vol. 29. P. 289–297. DOI: 10.1016/j.jiec.2015.03.036.
16. Войлошников Г.И., Войлошников Н.С., Григорьевна И.И., Вывальцев А.В. Сорбция золота активными углями из нецианистых растворителей и десорбция золота из насыщенного угля // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2010. № 7(47). С. 138–143. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sorbsiya-zolota-aktivnymi-uglyami-iz-netcianistykh-rastvoriteley-i-desorbsiya-zolota-iz-nasyschennogo-uglya> (дата обращения: 10.06.2025). EDN: NCGKJT.
17. Проценко О.А. Сорбция золота из цианидных растворов углеродсодержащими сорбентами // Химия и химическая технология в XXI веке: материалы XVI Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых, посвященной 115-летию со дня рождения профессора Л.П. Кулёва: в 2 томах, Томск, 25–29 мая 2015 года / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Т. 1. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2015. С. 75–77. EDN: UCZSGD.
18. Чубенко Я.Б., Зеличенко Е.А. Сорбция золота из хлоридных растворов целлюлозосодержащими материалами // Научный прорыв 2024: сборник статей II Международного научно-исследовательского конкурса, Пенза, 20 марта 2023 года. Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2024. С. 18–21. EDN: XPQZIU.

19. Benavente M., Moreno L., Martinez J. Sorption of heavy metals from gold mining wastewater using chitosan // *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2011. Vol. 42. Is. 6. P. 976–988. DOI: 10.1016/j.jtice.2011.05.003.
20. Radwan-Pragłowska J., Janus L., Sierakowska A., Ecofriendly chitosan-based super sorbent obtained under microwave radiation for valuable metals recovery from wastewater // *Polymer Testing*. 2022. Vol. 112. P. 107629. DOI: 10.1016/j.polymer-testing.2022.107629.
21. Мягкая И.Н., Сарыг-Оол Б.о. Ю., Лазарева Е.В., Жмодик С. М. Моделирование процесса сорбции Au природными сорбентами в условиях потока рассеяния сульфидного хвостохранилища // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия*. 2019. Т. 12. № 4. С. 580–589. DOI: 10.17516/1998-2836-0153. EDN: LCREEI.
22. Крымова В.В. Сорбционное извлечение ионов серебра (I) из растворов модифицированными бентонитами // *Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского*. 2014. Т. 27 (66). № 4. С. 109–116. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sorbtsionnoe-izvlechenie-ionov-serebra-i-iz-rastvorov-modifitsirovannymi-bentonitami> (дата обращения: 16.07.2025).
23. Белова Т.П., Хижко З.И. Устойчивость природных цеолитов при сорбции золота из модельных растворов при различных значениях pH // *Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия*. 2023. Т. 9. № 2. С. 251–258. DOI: 10.29039/2413-1725-2023-9-2-251-258. EDN: PUYNRT.
24. Белова Т.П. Кинетика сорбции ионов золота из водных растворов цеолитами // *Успехи современного естествознания*. 2023. № 6. С. 98–103. DOI: 10.17513/use.38059. EDN: POBRQJ.
25. Белова Т.П. Применение адсорбционных моделей для описания сорбции золота из хлоридных растворов природными цеолитами в статическом режиме // *Успехи современного естествознания*. 2023. № 7. С. 82–87. DOI: 10.17513/use.38075. EDN: KRAJXI.