

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ СОРБЦИИ/ДЕСОРБЦИИ ИОНОВ ЗОЛОТА (III)

© 2021 г. З.А. Мансуров^{1,2}, Ж.А. Супиева^{1,2}, М.А. Елеуов^{2,3}, А.Т. Таурбеков^{1,2},
В.В. Павленко^{1,2}, Г.Т. Смагулова^{1,2}

¹ Казахский национальный университет им. аль-Фараби,
г. Алматы, Республика Казахстан

² Институт проблем горения, г. Алматы, Республика Казахстан

³ Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева,
г. Алматы, Республика Казахстан

Статья поступила в редакцию 29.06.20 г., доработана 23.12.20 г., подписана в печать 25.12.20 г.

Аннотация: Для Республики Казахстан, как для страны с развитыми добывающими и перерабатывающими отраслями промышленности, актуальным направлением является развитие областей знаний, направленных на улучшение и совершенствование методов и технологий комплексной переработки сырья, в том числе для более полного извлечения благородных металлов. Основанием необходимости проведения этих исследований являются высокие потери благородных металлов при их переработке и выделении, а также совершенствование процесса их концентрирования. Достижения в области углеродных наноматериалов открывают большие перспективы для модернизации существующих технологий извлечения благородных металлов из отходящих растворов и пульп. В настоящей работе проведены комплексные исследования влияния скорости потока растворов, величины pH и присутствия ионов других металлов на извлечение золота на углеродном наноструктурированном материале из рисовой шелухи с дальнейшей его регенерацией и повторным использованием. Выявлено, что наивысшая степень извлечения ионов золота (III) наблюдается при pH ~ 2. Исследована эффективность извлечения золота при совместном присутствии меди, никеля и серебра. Рассмотрена зависимость электрохимической восстановительной сорбции золота от скорости потока растворов, оптимальная величина которой составила 10 мл/мин. Рассчитана сорбционная емкость сорбента на основе карбонизированной рисовой шелухи. Исследование электрохимической сорбции/десорбции ионов золота (III) показало, что процесс десорбции лучше протекает в смеси ацетон + вода + NaOH. При этом степень десорбции достигает 96 %, что свидетельствует о возможности регенерации углеродного материала электрода для повторного применения. Полученные результаты могут быть применены для оптимизации процессов извлечения благородных металлов из их растворов.

Ключевые слова: активированные угли, благородные металлы, электрохимическая сорбция, десорбция.

Мансуров З.А. — докт. хим. наук, профессор кафедры химической физики и материаловедения (ХФМ) Казахского национального университета (КазНУ) им. аль-Фараби (050040, Республика Казахстан, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 71); науч. руководитель Института проблем горения (ИПГ) (050012, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Богенбай батыра, 172). E-mail: zmansurov@kaznu.kz.

Супиева Ж.А. — докторант кафедры ХФМ КазНУ им. аль-Фараби; науч. сотрудник ИПГ. E-mail: zhazyra@mail.ru.

Елеуов М.А. — докторант КазНУ им. К.И. Сатпаева (050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22); науч. сотрудник ИПГ. E-mail: mukhtaryu@gmail.com.

Таурбеков А.Т. — докторант кафедры ХФМ КазНУ им. аль-Фараби; науч. сотрудник ИПГ. E-mail: azamat.taurbek@mail.ru.

Павленко В.В. — ст. преподаватель кафедры ХФМ КазНУ им. аль-Фараби; вед. науч. сотрудник ИПГ. E-mail: pavlenko-almaty@mail.ru.

Смагулова Г.Т. — ст. преподаватель кафедры ХФМ КазНУ им. аль-Фараби; зав. лабораторией функциональных наноматериалов ИПГ. E-mail: smagulova.gaukhar@gmail.com.

Для цитирования: Мансуров З.А., Супиева Ж.А., Елеуов М.А., Таурбеков А.Т., Павленко В.В., Смагулова Г.Т. Экспериментальное исследование закономерностей электрохимической сорбции/десорбции ионов золота (III). *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2021. Т. 27. No. 2. С. 4–13. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2021-2-4-13.

Experimental study of gold (III) ion electrochemical sorption/desorption regularities

Z.A. Mansurov^{1,2}, Zh.A. Supiyeva^{1,2}, M.A. Yeleuov^{2,3}, A.T. Taurbekov^{1,2}, V.V. Pavlenko^{1,2}, G.T. Smagulova^{1,2}

¹ Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Republic of Kazakhstan

² Institute of Combustion Problems, Almaty, Republic of Kazakhstan

³ Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan

Received 29.06.2020, revised 23.12.2020, accepted for publication 25.12.2020

Abstract: For the Republic of Kazakhstan as a country with developed mining and processing sectors, a topical issue is to develop the areas of knowledge aimed at improving and refining methods and technologies for comprehensive mineral processing including for the more complete extraction of precious metals. The necessity of these studies is determined by the high loss of precious metals during their processing and separation and the need to improve the process of their concentration. Advances in the field of carbon nanomaterials offer great prospects for improving existing technologies for the precious metal extraction from waste solutions and pulps. This paper covers the comprehensive studies into the influence of the solution flow rates, pH and the presence of ions of other metals on the extraction of gold on a carbon nanostructured material consisting of rice husk with its further regeneration and reuse. It was found that the highest gold (III) ion recovery is observed at pH ~ 2. The gold recovery efficiency was studied in the combined presence of copper, nickel and silver. The dependence of the electrochemical reduction sorption of gold on the flow rate of solutions was investigated. It was found that the optimal solution flow rate is 10 ml/min. The sorption capacity of a sorbent based on carbonized rice husk was calculated. The investigation of electrochemical sorption/desorption of gold (III) ions showed that the desorption process runs better in an acetone + water + NaOH mixture with a desorption degree of 96 %. This demonstrates the possibility of regenerating the electrode carbon material for reuse. The results obtained can be used to optimize the processes of extraction of precious metals from their solutions.

Keywords: activated carbons, precious metals, electrochemical sorption, desorption.

Mansurov Z.A. — Dr. Sci. (Chem.), Professor of the Department of chemical physics and material science, al-Farabi Kazakh National University (050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, al-Farabi ave., 71); Scientific director of the Institute of Combustion Problems (050012, Republic of Kazakhstan, Almaty, Bogenbai Batyr str., 172). E-mail: zmansurov@kaznu.kz.

Supiyeva Zh.A. — Doctoral student of the Department of chemical physics and material science, al-Farabi Kazakh National University; Research scientist of the Institute for Combustion Problems. E-mail: zhazyra@mail.ru.

Yeleuov M.A. — Doctoral student of the Satbayev University (050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, Satbayev str., 22); Research scientist of the Institute of Combustion Problems. E-mail: mukhtar.yu@gmail.com.

Taurbekov A.T. — Doctoral student of the Department of chemical physics and material science, al-Farabi Kazakh National University; Research scientist of the Institute for Combustion Problems. E-mail: azamat.taurbek@mail.ru.

Pavlenko V.V. — Senior lecturer of the Department of chemical physics and material science, al-Farabi Kazakh National University; Leading research scientist of the Institute for Combustion Problems. E-mail: pavlenko-almaty@mail.ru.

Smagulova G.T. — Senior lecturer of the Department of chemical physics and material science, al-Farabi Kazakh National University; Head of the Laboratory of functional nanomaterials, Institute for Combustion Problems. E-mail: smagulova.gaukhar@gmail.com.

For citation: Mansurov Z.A., Supiyeva Zh.A., Yeleuov M.A., Taurbekov A.T., Pavlenko V.V., Smagulova G.T. Experimental study of gold (III) ion electrochemical sorption/desorption regularities. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2021. Vol. 27. No. 2. P. 4–13 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2021-2-4-13.

Введение

Еще в конце XIX — начале XX вв. началось массовое применение активированных углей (АУ) в качестве сорбентов для извлечения и концентрирования благородных металлов. Основным их достоинством по сравнению с ионитами является высокая избирательность при сорбции золота из растворов со сложным солевым составом [1, 2].

Активированные угли обладают рядом уникальных свойств, таких как высокая пористость

с большой удельной поверхностью, электропроводность, а также устойчивость ко многим химическим реагентам, благодаря чему сфера их практического применения постоянно расширяется [3–5]. Одной из областей, привлекающих внимание исследователей в последние годы, является электрохимическая сорбция [6, 7].

Электросорбция (электрохимическая деминерализация) представляет собой технологию безре-

агентной экстракции ионов из водных растворов с целью концентрирования этих примесей на поверхности поляризованных пористых электродов из наноструктурированных материалов [8–10]. Электросорбция, как и ионообменная сорбция, основана на восстановлении ионов из водных растворов на сорбенте, который взамен поглощенных ионов посылает в водный раствор ионы того же знака. Основными преимуществами процесса электросорбции являются отсутствие отходов, высокая скорость восстановления ионов, низкое энергопотребление и устойчивость электродов к загрязнению в естественных условиях.

Для электросорбции можно использовать различные углеродные материалы, например активированный уголь. Его получают из скорлупы кокосовых орехов, опилок, угля, рисовой шелухи и др. Крупнотоннажные отходы от массового мирового производства риса (120 млн т/год в мире) служат дешевыми сорбентами для очистки различных газовых и жидких сред и используются для получения из них углерод-, кремний- и фосфорсодержащих материалов.

Для процесса активации целесообразно применять обработку газообразными соединениями или парами H_2O и CO_2 (физическая активация) либо расплавом KOH (химическая активация) [11, 12]. Для улучшения пористости АУ наиболее эффективным способом является двухстадийная активация, при которой гидроксид калия (KOH) используется при химической активации, а диоксид углерода (CO_2) — при физической [13]. Применение различных типов АУ для электросорбции изучалось в [14].

Авторы [15] исследовали свойства различных типов отечественных и зарубежных АУ: механическую прочность, кинетические и статические характеристики АУ при использовании кислотной и термической обработок. Было показано, что полное восстановление сорбционной способности АУ достигается в процессе термической реактивации. По мнению авторов, перспективными областями применения АУ в качестве сорбента являются нецианистые растворы, содержащие ионы золота, которые могут найти применение на линиях переработки упорных руд и концентратов при подземном выщелачивании благородных металлов, включая золото [16, 17].

В работе [18] исследована кинетика сорбции ионов AuCl_4^- с применением коммерческой марки активированного угля Norit GF-40. Исследова-

ния проводились при различных исходных концентрациях комплексных ионов хлорида золота (III), температуре и скорости перемешивания с применением спектрофотометрического анализа. В результате авторами было выдвинуто предположение о возможном влиянии золота, предварительно нанесенного на углерод, на процесс адсорбции.

Ранее [19, 20] было исследовано электровосстановление золота на углеродном электроде из карбонизированной рисовой шелухи (РШ). Методом пьезокварцевого микробаланса с комбинацией вольтамперометрии было определено количество электронов, участвующих в окислительно-восстановительной реакции. Также было установлено, что электровосстановление золота протекает через восстановление комплексов до образования металлического золота с выходом по току 97–99 %. Циклические вольтамперограммы на углеродном электроде позволили выявить зависимость пиковой плотности тока от квадратного корня скорости развертки потенциала, которая имеет линейный характер, что свидетельствует о диффузионном ограничении электрохимического восстановления золота. На основании уравнения Рэндлса—Шевчика был рассчитан коэффициент диффузии ионов золота. Установлено, что процесс электровосстановления золота на углеродном электроде протекает с высоким предельным катодным током, что обусловлено большой удельной поверхностью углеродного материала.

Настоящее исследование является продолжением работ, которые проводились в Институте проблем горения под руководством проф. З.А. Мансурова [6, 19, 20]. Его цель состояла в определении оптимальных условий электрохимической сорбции ионов золота (III) на углеродных электродах из рисовой шелухи. Задачей данной работы являлось проведение комплексных экспериментов по влиянию величины pH, скорости потока растворов и присутствия ионов других металлов на электросорбцию ионов золота (III) в статических/динамических условиях.

Материалы и методы исследования

В качестве основного компонента электродов для электросорбции золота из выщелоченных растворов использовали нанопористый углеродный материал, полученный карбонизацией и последующей химической активацией РШ. Методика

приготовления активированного угля из РШ подробно описана ранее [19, 20].

Для изготовления электродов в вагетовой ступке смешивали 8 мг АУ, 1 мг электропроводящей сажи марки TIMCAL Super C65 («Imerys», США) и 1 мг поливинилиденфторида («Sigma Aldrich», США) в качестве связующего. Затем в смесь добавляли 1 мл растворителя 1-метил-2-пирролидон («Sigma Aldrich») и осуществляли механическое перемешивание в течение 5 мин с дальнейшей ультразвуковой обработкой длительностью 30 мин для обеспечения гомогенности состава. После этого полученную смесь наносили на проводящую углеродную ткань площадью 18 см². Изготовленные электроды высушивали в вакуумном сушильном шкафу в течение 12 ч при температуре 413 К.

В качестве анодов при электрохимическом осаждении золота использовали платиновые пластины, а катодом служила углеродная ткань с покрытием из активированного угля, полученного из РШ. Электродом сравнения был хлорсеребряный электрод (ХСЭ).

Растворы золота готовили путем разбавления содержимого ампул государственного стандартного образца (ГСО) ионов золота (III) с концентрацией 100 мг/л дистиллированной водой. В качестве фонового электролита использовали 0,01 М раствор соляной кислоты. Для создания необходимой кислотности растворов (pH = 2–10) применяли 1 М растворы азотной кислоты и гидроксида калия (марки ХЧ).

Процесс электровосстановления ионов золота исследовали в стационарном режиме с помощью потенциостат-гальваностата Р-45Х фирмы «Elins» (Россия) в статических/динамических условиях. Измерения показателя активности ионов исходного раствора проводили с помощью pH-метра 150МИ. Концентрацию ионов металлов в растворах до и после сорбции определяли на атомно-абсорбционном спектрометре Analyst 200 («Perkin Elmer», США), с атомизацией в пламени ацетилен-воздуха методом построения градуировочного графика. Для обеспечения подачи и циркуляции раствора использовали перистальтический насос фирмы «MasterFlex» (США).

Морфологию поверхности углеродного электрода после сорбции ионов золота оценивали методом сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа (EDAX-спектр Quanta 3D 200i Dual System, FEI).

Результаты и их обсуждение

Оптимальная величина pH раствора для электросорбции ионов золота (III)

На процесс электровосстановления ионов металлов влияют многие параметры, в том числе pH раствора, из которого проводят процесс осаждения [21]. В связи с этим было исследовано влияние этого показателя на процесс электросорбции ионов золота (III) из его растворов. На рис. 1 показаны полученные результаты. Видно, что процесс электрохимического восстановления ионов золота (III) протекает интенсивнее в кислой среде. При этом оптимальные значения pH составляют от 1 до 6. При pH ~ 1,92 извлечение золота достигает 1,51 мг/л при 15-минутной выдержке и 1,9 мг/л при $\tau = 30$ мин, что в 4,4–15,0 раза выше, чем при pH ~ 10,0.

В сильноокислительных средах наличие большой концентрации ионов H⁺ позволяет увеличить скорость восстановления ионов золота (III). Это указывает на сильную зависимость окислительно-восстановительного процесса от pH раствора. Все дальнейшие исследования проводили при pH ~ 2.

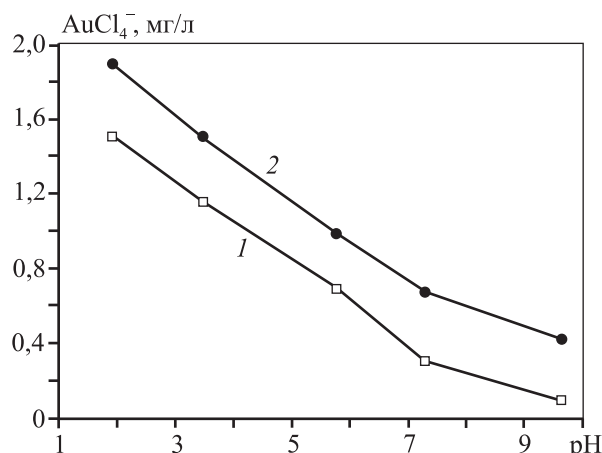


Рис. 1. Влияние величины pH на электрохимическую сорбцию ионов золота (III) при 1000 мВ (ХСЭ) с выдержкой $\tau = 15$ (1) и 30 (2) мин

Fig. 1. pH effect on the electrochemical sorption of gold (III) ions at 1000 mV (silver chloride electrode) with $\tau = 15$ (1) and 30 (2) min holding time

Эффективность извлечения ионов золота (III) при наличии в растворе ионов других металлов

Ввиду того, что на практике концентрирование благородных металлов проводят из растворов,

Таблица 1. Влияние AgNO_3 на сорбцию золотаTable 1. AgNO_3 effect on gold sorption

Исходные концентрации, мг/л		Время сорбции, мин	Конечные концентрации, мг/л		Степень извлечения Au, %
Au	AgNO_3		Au	Ag	
24	90	5	9,182	52,513	61,17
		10	1,719	29,155	92,84
		15	1,433	29,083	94,03
		20	1,375	28,801	94,27
		25	1,212	28,412	94,95
		30	0,845	28,327	96,48

Таблица 2. Влияние CuSO_4 на сорбцию золотаTable 2. CuSO_4 effect on gold sorption

Исходные концентрации, мг/л		Время сорбции, мин	Конечные концентрации, мг/л		Степень извлечения Au, %
Au	CuSO_4		Au	Cu	
24	34,1	5	0,912	14,687	96,20
		10	0,884	13,853	96,32
		15	0,715	13,846	97,02
		20	0,581	13,796	97,58
		25	0,447	13,717	98,14
		30	0,413	13,695	98,28

Таблица 3. Влияние $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ на сорбцию золотаTable 3. $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ effect on gold sorption

Исходные концентрации, мг/л		Время сорбции, мин	Конечные концентрации, мг/л		Степень извлечения Au, %
Au	$\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$		Au	Ni	
24	4,1	5	0,958	2,095	96,00
		10	0,957	1,405	96,01
		15	0,885	1,380	96,31
		20	0,821	1,290	96,58
		25	0,794	1,215	96,69
		30	0,734	1,119	96,94

содержащих примеси, в частности в виде ионов других металлов, были проведены исследования по извлечению ионов золота (III) в присутствии ионов меди и никеля. Также было рассмотрено совместное извлечение золота и серебра. В табл. 1–3 представлены данные по сорбции золота в присутствии солей AgNO_3 , CuSO_4 и $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$.

Полученные результаты показывают эффективность применения сорбентов на основе активированных углей из РШ для извлечения ионов

золота (III) из растворов, содержащих примеси. При этом выявлено, что скорость их осаждения выше, чем ионов-примесей. Так, при 5-минутной выдержке степень извлечения золота в присутствии CuSO_4 и $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ составляет не менее 96 %, в то время как для ионов-примесей она не превышает 57 %. Полученный таким образом золотосодержащий концентрат может эффективно использоваться для дальнейшего получения чистого золота.

Для AgNO_3 наблюдается несколько иная тенденция в процессе сорбции: в начальный период степень извлечения золота достигает ~61 %, но уже через 10 мин скорость сорбции повышается. Так как радиус атомов золота ($174 \cdot 10^{-12}$ м) и серебра ($165 \cdot 10^{-12}$ м) меньше или сравним с радиусом мезо- (~1,1 нм) и микропор (~3 нм) активированного угля из РШ, то возможно имеет место их дальнейшая диффузия внутрь пор и, как следствие, более полное заполнение внутреннего объема углеродного материала. Этим, в частности, можно объяснить их высокую сорбционную емкость. Еще одна причина эффективности этого процесса может быть связана с двойственным характером поведения углеродного материала при сорбции: в порах углеродного материала возможны ионный обмен, а также электрохимическое восстановление, вследствие чего эффективность физической сорбции увеличивается благодаря протеканию химических реакций на поверхности.

Влияние скорости потока раствора на степень извлечения ионов золота (III)

Скорость потока растворов ионов золота (III) является важной характеристикой при электрохимической сорбции. На рис. 2 представлен график изменения концентрации ионов золота (III) в растворе при наложении поляризационного напряжения $U = 1000$ мВ и без него при скорости потока

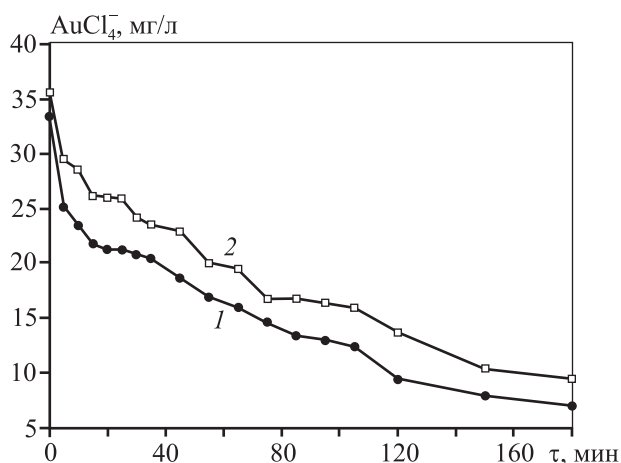


Рис. 2. График изменения концентрации ионов золота (III) в растворе при наложении поляризационного напряжения 1000 мВ (1) и без него (2) при скорости потока 10 мл/мин

Fig. 2. Chart showing changes in gold (III) ion concentration in the solution with (1) and without (2) 1000 mV polarization voltage at 10 ml/min flow rate

$v = 10$ мл/мин. Видно, что скорость восстановления ионов золота (III) при потенциале 1000 мВ на 6 % выше, чем в его отсутствие (без подачи тока), поэтому дальнейшие исследования проводились при $U = 1000$ мВ.

Изучалось влияние скорости потока раствора золота на степень его извлечения. Условия эксперимента были следующими: время электросорбции — 180 мин, объем сорбционного раствора — 0,5 л и масса сорбента $m = 0,1$ г. На рис. 3 представлен график изменения концентрации ионов золота (III) в растворе при различной скорости его потока ($v = 0, 5, 10$ мл/мин) и поляризационном напряжении 1000 мВ. Установлено, что спустя 180 мин с начала проведения процесса с повышением величины v возрастает степень восстановления ионов золота (III) на поверхности электрода из активированного углерода.

Количество сорбированного вещества на единицу массы углеродного сорбента рассчитывали по формуле [22]

$$a = \frac{(C_0 - C)V}{m},$$

где C_0 и C — концентрации ионов металла в растворе до и после сорбции соответственно, мг/л; V — объем сорбционного раствора, л; m — масса сорбента, г. Полученные данные приведены ниже:

Скорость потока, мл/мин	0	5	10
Степень извлечения ионов AuCl_4^- , % ...	29	43	79
Масса сорбированного вещества, мг/г....	39	93	190

Таким образом, установлено, что процесс электросорбции протекает интенсивнее при более высоких скоростях потока раствора для систем рециркуляции из-за лучшего смешивания. При этом оптимальное значение v , при котором наблюдается максимальное электроосаждение золота, составило 10 мл/мин, при $v < 10$ мл/мин степень извлечения снижается с 79 до 29 %.

После электросорбции ионов золота (III) на поверхности углеродного электрода формируется налет желтого цвета с характерным металлическим блеском. Формирование кластеров золота подтверждается результатами энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии и сканирующей электронной микроскопии. Энергодисперсионный рентгеновский спектр имеет характерную полосу поглощения нанокристаллитами металлического золота приблизительно при 2,1 кэВ

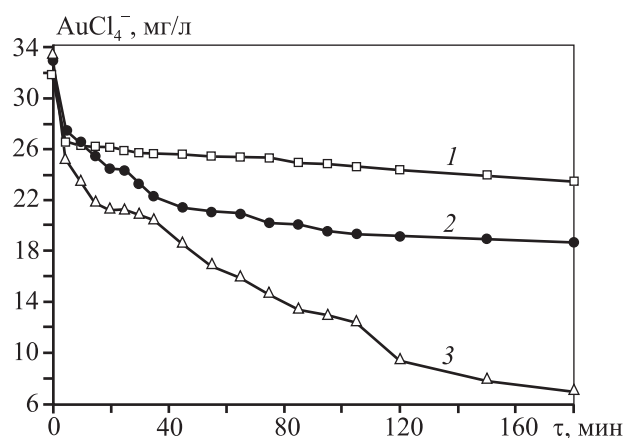


Рис. 3. График изменения концентрации ионов золота (III) в растворе при различной скорости его потока

$v = 0$ (1), 5 мл/мин (2) и 10 мл/мин (3); $U = 1000$ мВ

Fig. 3. Chart showing changes in gold (III) ion concentration in the solution at its varying flow rate

$v = 0$ (1), 5 ml/min (2) and 10 ml/min (3); $U = 1000$ mV

(рис. 4, а). Элементное картирование и снимки сканирующей электронной микроскопии показали, что на поверхности углеродного электрода после осаждения образуется больше число кластеров золота с размерами 293,74–610,92 нм (рис. 4, б–з).

При концентрации золота 33,21 мг/л практически полное извлечение металла достигается на углеродном электроде при напряжении 1000 мВ после 3-часовой продолжительности процесса.

Исследование процессов электросорбции/десорбции ионов золота (III)

Изучена эффективность различных растворов элюата на десорбцию ионов золота (III) с поверхности сорбента (табл. 4). Использование смеси ацетона с водой и 1 г/л NaOH при времени извлечения золота 2 ч обеспечило степень десорбции золота 88 %, а применение смеси изопропилового спирта с водой и 1 г/л NaOH при продолжительности процесса 5 ч — 67 %.

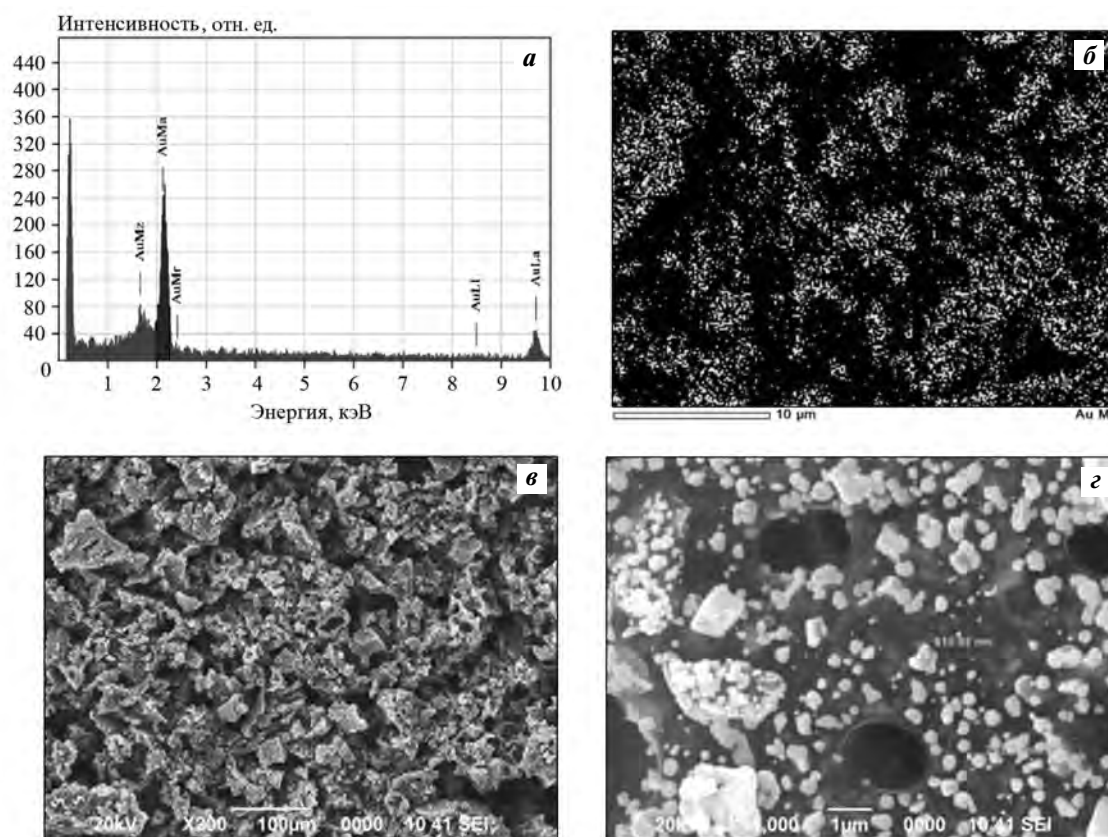


Рис. 4. Результаты энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (а, б) и сканирующей электронной микроскопии (в, з) поверхности углеродного электрода с наночастицами золота

Fig. 4. Results of energy dispersive X-ray spectroscopy (а, б) and scanning electron microscopy (в, з) of carbon electrode surface with gold nanoparticles

Таблица 4. Значения эффективности десорбции золота в десорбирующий раствор при различных условиях
Table 4. Efficiency of gold desorption into the desorbing solution at different conditions

Сорбент	Элюат (десорбирующая жидкость)	NaOH, г/л	T, К	Степень десорбции Au, %	Время извлечения Au, ч
Углеродный материал из рисовой шелухи (0,01 г Au/1 г угля)	Ацетон + вода + NaOH	—	303	35	2
		1		88	
		2		96	
		10		93	
		20		91	
	Изопропиловый спирт + вода + NaOH	—	303	15	5
		1		67	
		2		74	
		10		76	
		20		77	

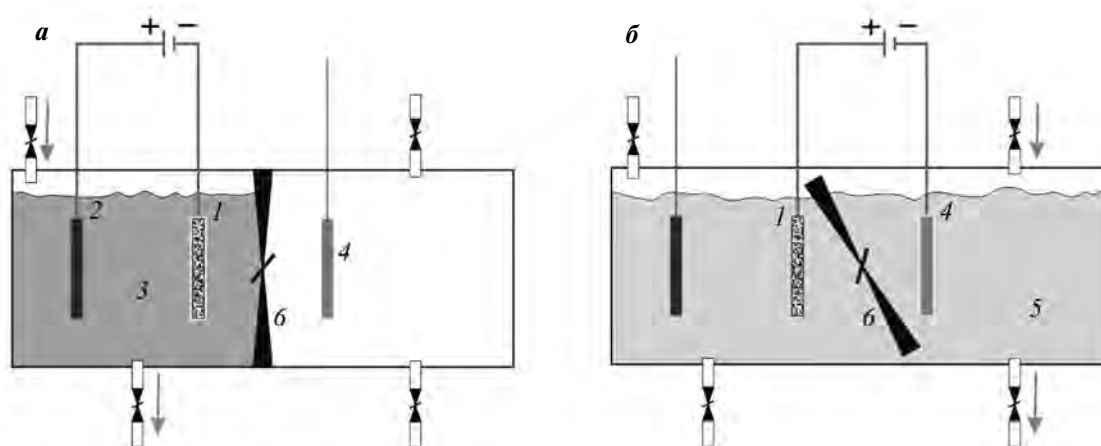


Рис. 5. Принципиальная схема системы электросорбции и десорбции ионов золота (III)

Пояснения см. в тексте

Fig. 5. Gold (III) ion electrosorption and desorption system circuit diagram

See explanations in the text

Как видно из табл. 4, наиболее полное растворение золота с поверхности сорбента, и как следствие, регенерация активированного угля наблюдаются при выборе в качестве элюата смесей ацетон + вода + 2 г/л NaOH, изопропиловый спирт + вода + 20 г/л NaOH.

Таким образом, изученный способ регенерации активированного угля, используемого при извлечении золота, позволяет:

- повысить скорость десорбции и степень извлечения золота;
- снизить температуру десорбции золота в сравнении с известными способами;

— использовать элюат (десорбирующая жидкость), не содержащий токсичный цианид натрия;

— проводить регенерацию отработанных активированных углей после селективного извлечения золота с применением простой конструкции.

Принципиальная схема системы электросорбции и десорбции показана на рис. 5. Процесс включает выщелачивание золота раствором царской водки 3 с последующей электросорбцией растворенного золота на углеродном электроде 1 (рис. 5, а) (анод представляет собой Pt-пластину). Раствор золота после сорбции углеродным электродом возвращается в контур выщелачивания,

а нагруженный золотом углерод подается в зону элюирования, разделенную с контуром выщелачивания подвижной перегородкой 6 (рис. 5, б). Золото извлекают из нагруженного золотом электрода 1 с помощью горячего раствора элюата (смесь ацетона и воды при объемном соотношении 1 : 1, в котором растворен 1 г гидроксида натрия 5) и электросорбируют на катоде из нержавеющей стали 4 в электролитической ячейке (рис. 5, б). Электрод на основе активированного угля может быть использован многократно в процессе электросорбции золота из раствора и обратной десорбции.

Заключение

Проведены экспериментальные исследования закономерностей электрохимической восстановительной сорбции ионов золота (III). Было рассмотрено влияние pH раствора на степень извлечения ионов золота (III) и установлено, что наивысшая ее величина составляет 37 % при pH раствора = 1,92. При значениях pH ~10 степень извлечения золота в 3—4 раза ниже.

Исследована эффективность извлечения золота при совместном присутствии ионов меди, никеля и серебра. Показано, что данные металлы с концентрацией, значительно превышающей концентрацию золота, не мешают эффективной сорбции ионов золота (III), так как скорость сорбции золота значительно выше.

Проведены исследования процесса контролируемой сорбции/десорбции золота с поверхности углеродного материала для его регенерации и повторного применения. Наилучшие результаты получены при использовании в качестве элюата смеси ацетон + вода + NaOH при концентрации гидроксида натрия 2 г/л.

При использовании углеродного материала из рисовой шелухи наблюдается процесс электрохимического восстановления ионов золота (III) из солянокислых растворов до металлического состояния. Установлено, что оптимальная скорость потока растворов при извлечении ионов золота (III) в статических условиях и поляризационном напряжении 1000 мВ равна 10 мл/мин. Ниже этого значения степень извлечения золота снижается.

Область применения полученных результатов включает комплексную переработку отходов перерабатывающих предприятий для извлечения ценных компонентов в виде благородных металлов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан (проект № AP05134691).

Funding: *The study was carried out under financial support of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (Project № AP05134691).*

Литература/References

1. Кинцле Х., Бадер Э. Активные угли и их промышленное применение. Л.: Химия, 1984.
Kintsle H., Bader E. Active coals and their industrial applications. Leningrad: Khimiya, 1984 (In Russ.).
2. Sun T.M., Yen W.T. Kinetics of gold chloride adsorption onto activated carbon. *Miner. Eng.* 1993. Vol. 6(1). P. 17—29.
3. Morcali M. H., Zeytuncu B., Akman S., Yucel O. Sorption of gold from electronic waste solutions by a commercial sorbent. *Chem. Eng. Comm.* 2014. Vol. 201 (8). P. 1041—1053.
4. Albishri H.M., Marwani H.M. Chemically modified activated carbon with tris(hydroxymethyl)aminomethane for selective adsorption and determination of gold in water samples. *Arab. J. Chem.* 2016. Vol. 9. P. S252—S258.
5. Parlayıcı Ş., Pehlivan E. Adsorption of Cr (VI) from the aqueous solution by apricot stones activated carbon. *Inter. Proc. Chem., Biol. Envir. Engin.* 2017. Vol. 101. P. 142—148.
6. Mansurov Z.A., Mansurova R.M., Zakharov V.A., Supiyeva Zh.A. Adsorption of Au (III) ions by carbonized apricot stones in presence of heavy metal ions. *J. Chem. Technol. Metal.* 2020. Vol. 55 (5). P. 1047—1056.
7. Tarasenko Y.A., Lapko V.F., Kopyl S.A., Kuts' V.S., Gerasimuk I.P. Reductive sorption of tetrachloroaurate ions at active carbons. *Russ. J. Phys. Chem.* 2003. Vol. 77(9). P. 1477—1481.
8. Ratajczak P., Suss M.E., Kaasik F., Beguin F. Carbon electrodes for capacitive technologies. *Energy Storage Mater.* 2019. Vol. 16. P. 126—145. DOI: 10.1016/j.ensm.2018.04.031.
9. Humplik T., O'Hern S.C., Fellman B.A. Nanostructured materials for water desalination. *Nanotechnology.* 2011. Vol. 22(29). P. 292001.
10. Oren Y. Capacitive deionization (CDI) for desalination and water treatment — past, present and future (A review). *Desalination.* 2008. Vol. 228. P. 10—29. DOI: 10.1016/j.desal.2007.08.005.
11. Zou L., Morris G., Qi D. Using activated carbon electrode in electrosorptive deionisation of brackish water. *Desalination.* 2008. Vol. 225(1-3). P. 329—340.
12. Wang G., Qian B., Dong Q. Highly mesoporous activated carbon electrode for capacitive deionization. *Separ. Purif. Technol.* 2013. Vol. 103. P. 216—221.

13. Yeh C.-L., Hsi H.-C., Li K.-C., Hou C.-H. Improved performance in capacitive deionization of activated carbon electrodes with a tunable mesopore and micropore ratio. *Desalination*. 2015. Vol. 367. P. 60—68.
14. Blair J.W., Murphy G.W. Electrochemical demineralization of water with porous electrodes of large surface area: Saline water conversion. *Adv. Chem.* 1960. Vol. 27. P. 206—223.
15. Войлошников Г.Г., Чернов В.К. Опыт и перспективы промышленного использования активных углей в схемах извлечения золота. *Цветные металлы*. 2001. No. 5. С. 15—17.
Voiloshnikov G.G., Chernov V.K. Experience and prospects of industrial use of activated carbons in gold recovery schemes. *Tsvetnye metally*. 2001. No. 5. P. 15—17 (In Russ.).
16. Поконова Ю.В., Грабовский А.И. Углеродный адсорбент для извлечения и концентрирования золота из растворов. *Цветные металлы*. 2001. No. 11. С. 36—41.
Pokonova Yu.V., Grabovsky A.I. Carbon adsorbent for the extraction and concentration of gold from solutions. *Tsvetnye metally*. 2001. No. 11. P. 36—41 (In Russ.).
17. Senanayake G. Gold leaching by copper (II) in ammoniacal thiosulphate solutions in the presence of additives. Pt. I: A review of the effect of hard—soft and Lewis acid-base properties and interactions of ions. *Hydrometallurgy*. 2012. Vol. 115–116. P. 1—20. DOI: 10.1016/j.hydromet.2011.11.011.
18. Paclawski K., Wojnicki M. Kinetics of the adsorption of gold (III) chloride complex ions onto activated carbon. *Arch. Metal. Mater.* 2009. Vol. 54(3). P. 853—860.
19. Supiyeva Zh., Avchukir Kh., Taurbekov A., Yeleuov M., Smagulova G., Pavlenko V., Mansurov Z. The investigation of electroreduction of AuCl_4^- in the case of gold electrosorption using activated carbon. *Mater. Today: Proc.* 2020. Vol. 25 (1). P. 33—38. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.11.013.
20. Mansurov Z., Supiyeva Zh., Avchukir Kh., Smagulova G. Investigation of gold electrosorption onto gold and carbon electrodes using an electrochemical quartz crystal microbalance. *Eur. Chem.-Technol. J.* 2019. No. 4. P. 283—289.
21. Бобоев И.Р., Сельницын Р.С., Холиков Т.А., Шарипов Б.К. Технология извлечения золота тиомочевинным выщелачиванием из лежалых отвалов. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2020. No. 2. С. 4—13.
Boboev I.R., Selnitsyn R.S., Kholikov T.A., Sharipov B.K. Technology of gold extraction by thiourea leaching from stale dumps. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2020. No. 2. P. 4—13 (In Russ.).
22. Холмогорова А.С. Сорбционно-спектроскопическое определения палладия (II), платины (IV) и серебра (I) с применением дитиооксимирированного полисилоксана: Дис. ... канд. хим. наук. Екатеринбург: Ин-т техн. химии, 2016.
Kholmogorova A.S. Sorption-spectroscopic determination of palladium (II), platinum (IV) and silver (I) using dithiooxamidated polysiloxane: Dis. ... Cand. Sci. (Chem.). Ekaterinburg: Institut tekhn. khimii, 2016 (In Russ.).