

СИНТЕЗ ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ПОЛИ(N-ВИНИЛИМИДАЗОЛА) И ОЦЕНКА ЕГО СОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПО ОТНОШЕНИЮ К ПАЛЛАДИЮ(II) И ЗОЛОТУ(III)

© К. Я. Кузнецова¹, О. Д. Якурнова¹, Д. А. Казанцев², Ю. С. Петрова¹,
А. В. Пестов^{1,2}, Л. К. Неудачина¹

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

² Институт органического синтеза им. И. Я. Постовского УрО РАН,
620137, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 22
E-mail: lopunova.97@mail.ru

Поступила в Редакцию 18 марта 2024 г.
После доработки 27 декабря 2024 г.
Принята к публикации 27 декабря 2024 г.

С целью направленного получения сорбционных материалов для селективного извлечения Pd(II) и Au(III) проведена двустадийная кватернизирующая сшивка поли(N-винилимидазола) с использованием 1,4-бис(бромметил)бензола и поли(винилхлорида). В результате полимераналогичного превращения донорные имидазольные центры эквивалентно превращены в катионные центры с общей степенью кватернизации 70%. Полученный анионит проявляет хорошую селективность по отношению к Pd(II) и Au(III) в солянокислых средах в присутствии Cu(II), Co(II), Ni(II), Zn(II) и Cd(II). Наибольшая степень селективности сорбции Au(III) по сравнению с Pd(II) реализуется при pH 4.5. Анализ полученных данных позволяет сделать предположение об ионообменном механизме сорбции. Использование в качестве регенеранта солянокислого раствора тиомочевины позволяет достичь количественной десорбции ионов металлов.

Ключевые слова: поли(N-винилимидазол); сорбция; золото(III); палладий(II); хлоридные растворы
DOI: 10.31857/S0044461824110057; EDN: PBZCOP

К настоящему времени известно большое количество химических превращений, катализируемых соединениями золота и палладия, позволяющих с высокими выходами получать необходимые продукты органического синтеза (см., например, [1]). Основным ограничивающим фактором широкого использования подобных каталитических систем является высокая стоимость благородных металлов, обусловленная их низким кларковым числом и трудностью выделения из природных объектов. Для определения данных металлов в объектах окружающей среды и вторичном

сырье на фоне ионов других переходных металлов на стадии пробоподготовки во многих случаях используются различные методы разделения и концентрирования, что связано с низким содержанием аналита и сложным составом рассматриваемых объектов.

В промышленных растворах Pd(II) и Au(III) находятся в основном в виде хлоридных комплексов [2]. Наиболее перспективными для селективного извлечения благородных металлов из хлоридных растворов различного состава являются сорбенты, содержащие донорные атомы азота [3, 4]. Такие материалы спо-

собны извлекать целевые компоненты как за счет комплексообразования, так и за счет ионного обмена с участием анионных хлоридных комплексов Au(III) и Pd(II). Однако сорбционные материалы, которые в ряде случаев позволяют добиться высокой селективности извлечения отдельных ионов благородных металлов, немногочисленны и чаще всего обладают рядом недостатков, таких как низкая механическая прочность, термическая устойчивость, высокая стоимость. Поли(N-винилимидазол), как основание Льюиса, способен образовывать устойчивые комплексные соединения с ионами металлов за счет наличия в своем составе имидазольных групп [5, 6], но его использование в качестве сорбента не представляется возможным из-за значительной растворимости практически во всем диапазоне pH.

Цель работы — оценка возможности использования сорбционного материала на основе поли(N-винилимидазола) для селективного извлечения Pd(II) и Au(III) из растворов, содержащих другие переходные металлы.

Экспериментальная часть

Поли(N-винилимидазол) (99%, Sigma-Aldrich, кат. № 235466-100G), 1,4-бис(бромметил)бензол (98%, Sigma-Aldrich, кат. № S36308-100MG), поли(винилхлорид) (98%, Sigma-Aldrich, кат. № 81387-250G) были использованы без дополнительной очистки. Содержание C, H и N определяли с помощью элементного анализатора Perkin Elmer PE 2400 серия PCHN-OEA 1108. Содержание брома определяли меркуриметрическим титрованием.¹ ИК-спектры получены на ИК-Фурье-спектрометре Nicolet 6700 (Thermo Scientific) с приставкой нарушенного полного внутреннего отражения с алмазным кристаллом в диапазоне 4000–450 см⁻¹. Термограммы регистрировали на дериватографе TGA/DSC 1 (Mettler Toledo) при скорости нагрева 10 град·мин⁻¹ в среде аргона (высокой чистоты, ООО «ГТС»), скорость подачи газа 60 мл·мин⁻¹.

Степень функционализации (СФ) поли(N-винилимидазола) рассчитывали по формуле

$$\text{СФ} = [(C/N)_{\text{продукт}} - (C/N)_{\text{поли(N-винилимидазол)}}]/n, \quad (1)$$

где $(C/N)_{\text{продукт}}$ и $(C/N)_{\text{поли(N-винилимидазол)}}$ — атомное отношение элементов углерода и азота в продукте и

исходном поли(N-винилимидазоле) соответственно, n — число атомов углерода в молекуле сшивающего агента, $n = 8$ в случае функционализации 1,4-бис(бромметил)бензолом, $n = 2$ — поли(винилхлоридом).

Синтез сорбента осуществляли следующим образом: на первой стадии смесь 5.00 г поли(N-винилимидазола), 14.02 г 1,4-бис(бромметил)бензола, 7.34 г K₂CO₃ (х.ч., АО «БЕКТОН») и 95 мл N,N-диметилформамида (99%, Sigma-Aldrich, кат. № D4551-500ML) перемешивали при 70°C в течение 24 ч, затем измельчали, диспергировали в 100 мл 96% этанола (класс альфа, ООО «Константа-Фарм М»), выдерживали 24 ч при 22°C. Осадок отфильтровывали, промывали дистиллированной водой (электрический дистиллятор ДЭ-4 ТЗМОИ (АО «Тюменский завод медицинского оборудования и инструментов») и сушили при 23°C в вакууме до постоянной массы. Выход продукта состава (%): C 32.55, H 6.77, N 7.63, Br 19.40 — составил 14.07 г (74%). В ИК-спектре наблюдаются полосы поглощения (см⁻¹): 3392, 3082, 2938, 1651. Степень функционализации составила 62%.

Полученный продукт был дополнительно модифицирован поли(винилхлоридом). Для этого смесь 14.07 г продукта первой стадии, 3.32 г поли(винилхлорида), 7.34 г сухого K₂CO₃ и 50 мл N,N-диметилформамида перемешивали при 70°C в течение 24 ч. Модифицированный поли(винилхлоридом) полимер измельчали, диспергировали в 100 мл N,N-диметилформамида, выдерживали 24 ч при 22°C. Затем осадок отфильтровывали, промывали дистиллированной водой и сушили при 23°C в вакууме до постоянной массы. Выход продукта состава (%): C 48.50, H 5.46, N 11.01 — составил 14.08 г (81%). В ИК-спектре наблюдаются полосы поглощения (см⁻¹): 3394, 3054, 2937, 1656, 1425, 1151 (рис. 1). Степень функционализации на второй стадии составила 8%.

Растворы хлоридов Pd(II) и Au(III) концентрацией 1 мг·мл⁻¹ готовили из соответствующих металлов (Pd — 99.98%, Au — 99.9%, АО «Екатеринбургский завод по обработке цветных металлов»). Навеску металла массой 0.1000 г взвешивали на аналитических весах BL60S (Sartorius, класс точности ±0.7 мг) и при нагревании растворяли в смеси концентрированных HNO₃ (65%, х.ч., ООО ОРТ «Химреактивы») и HCl (32%, х.ч., ООО ОРТ «Химреактивы») ($c_{\text{HNO}_3}:c_{\text{HCl}} = 1:3$), раствор упаривали досуха, добавляли 5 мл концентрированной HCl (32%, х.ч., ООО ОРТ «Химреактивы») и 0.10 г NaCl (х.ч., АО «БЕКТОН»), снова упаривали досуха, сухой остаток растворяли в 20 мл HCl (1:1), раствор количественно переносили в мерную колбу емкостью 100.0 мл и доводили до метки дистиллированной водой.

¹ МВИ 88-16358-72-2008. Определение массовой доли хлора или брома в органических соединениях методом меркуриметрического титрования.

Растворы солей металлов готовили растворением навесок $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (все — х.ч., АО «БЕКТОН») в точном объеме дистиллированной воды.

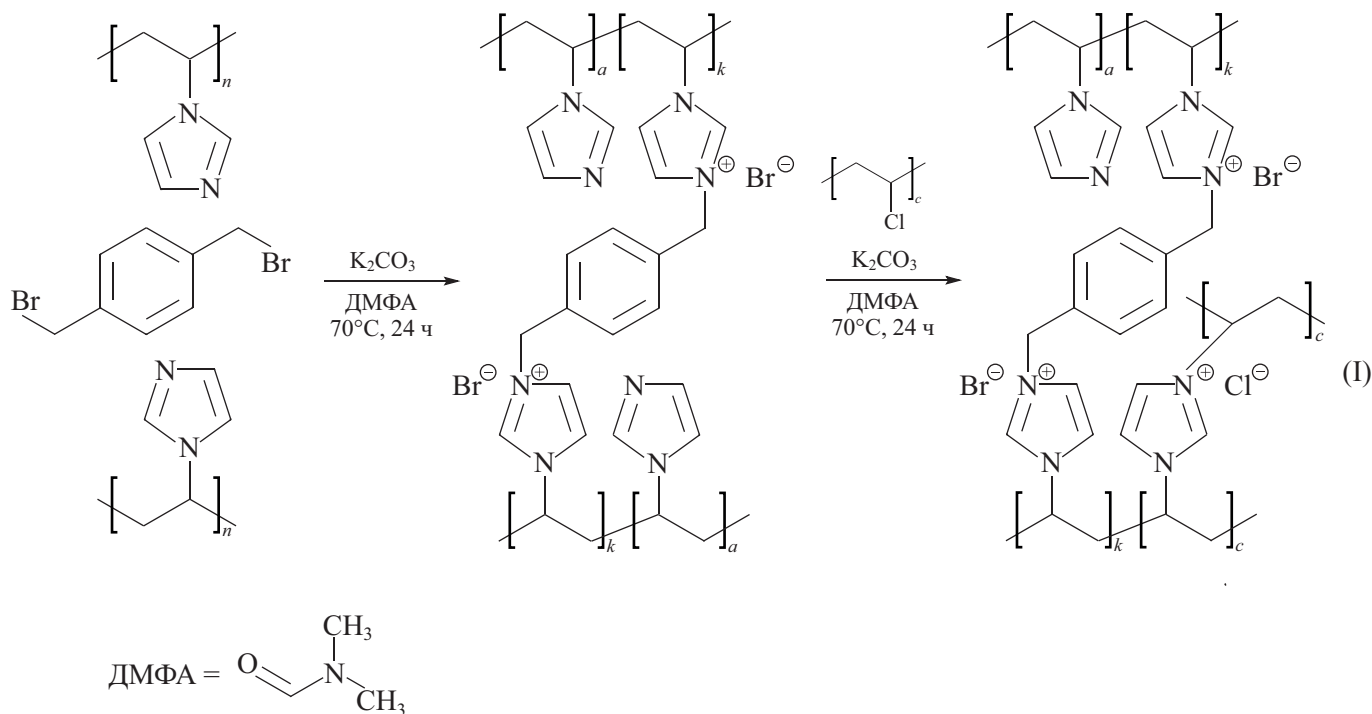
Сорбцию Pd(II) и Au(III) в присутствии Cu(II), Co(II), Ni(II), Zn(II) и Cd(II) сшитым поли(N-винилимидазолом) изучали в статических условиях методом ограниченного объема при исходной концентрации ионов металлов $1 \cdot 10^{-4}$ моль·л⁻¹ из солянокислых растворов в интервале pH 1.0–5.0 (концентрация свободных хлорид-ионов в диапазоне pH 2.0–5.0 составляла ~ 0.05 моль·л⁻¹), а также из растворов HCl концентрациями 1, 2 и 3 моль·л⁻¹. Масса сорбента составляла 0.0200 г, объем раствора — 50.0 мл. Значение pH растворов контролировали при помощи иономера И-160 (ООО «Измерительная техника»). Необходимую кислотность среды создавали с помощью 1 М HCl (х.ч., ООО ОПТ «Химреактивы») и 1 М NaOH (х.ч., ООО «Полихим»). Полученные растворы добавляли к сорбенту и оставляли на 5 сут при периодическом перемешивании.

Десорбцию ионов металлов проводили в течение 24 ч после их сорбции в статических условиях 25.0 мл 1%-ного раствора тиомочевина (х.ч., ООО «Аделит») в 3 моль·л⁻¹ HCl (х.ч., ООО ОПТ «Химреактивы»).

Концентрации ионов металлов в растворах до и после сорбции определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии с пламенной атомизацией на спектрометре Solaar M6 (Thermo Scientific). Коэффициенты селективности $K_{M1/M2}$ рассчитывали как отношение коэффициентов распределения ионов M1 и мешающего иона M2 между раствором и сорбентом [7].

Обсуждение результатов

Для сшивки поли(N-винилимидазола) путем полимераналогичных превращений можно использовать реакцию алкилирования дигалогенпроизводными, которая приводит к формированию кватернизованной соли имидазола [8]. В настоящей работе в качестве сшивающего реагента использовали реакционноспособный 1,4-бис(бромметил)бензол:



Реакция алкилирования поли(N-винилимидазола) протекает эффективно, степень кватернизации достигает 62%, при этом полимер теряет растворимость в водных растворах, что указывает на формирование сетчатой структуры. Большее значения степени кватернизации достичь не удастся, по-видимому, из-за пространственных затруднений формирования ди-

метиленифенилиденового сшивающего агента. В ИК-спектре (рис. 1, I) присутствуют полосы поглощения при 3134 и 2938 см⁻¹, которые отвечают валентным колебаниям связей C—H имидазольного цикла и алифатической основной цепи поли(N-винилимидазола) соответственно. После проведения сшивки 1,4-бис(бромметил)бензолом в ИК-спектре (рис. 1, II) допол-

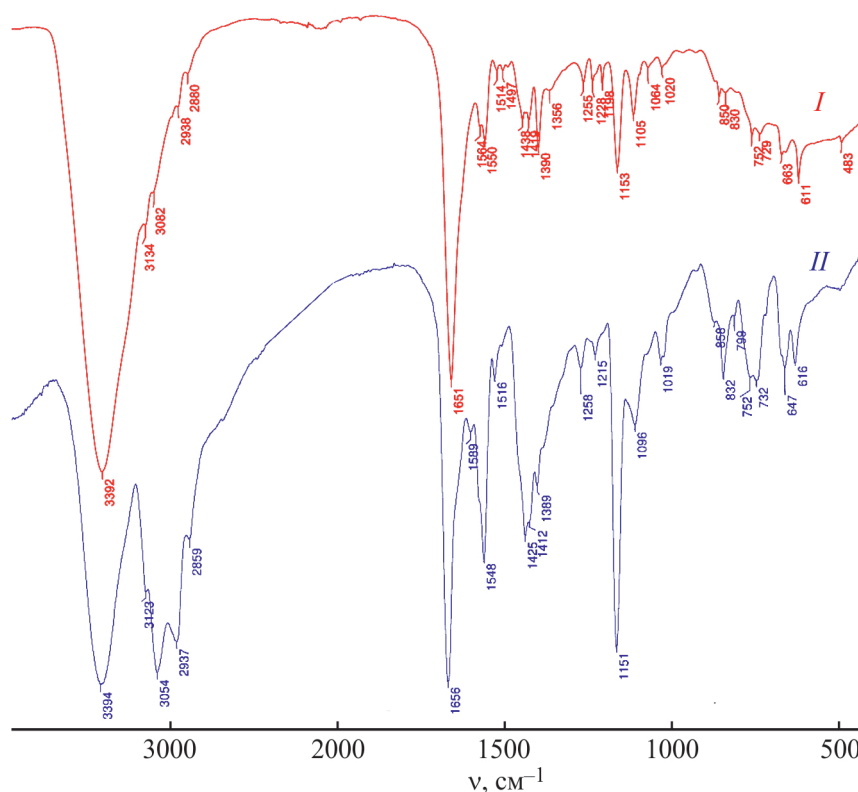


Рис. 1. ИК-Фурье-спектры отражения поли(*N*-винилимидазола), сшитого 1,4-бис(бромметил)бензолом (*I*), и продукта его модификации поли(винилхлоридом) (*II*).

нительно возникают полосы поглощения при 3082 и 1651 см⁻¹, отвечающие валентным колебаниям связей С—Н и скелетным колебаниям С=С бензольного цикла соответственно.

Благодаря формированию сетчатой структуры после обработки поли(*N*-винилимидазола) 1,4-бис(бромметил)бензолом продукт не растворяется во всем диапазоне рН, но демонстрирует высокую степень набухания 385% при рН 2. Это, по-видимому, обусловлено значительным увеличением гидрофильности полимера благодаря формированию сетки катионных центров с высокой плотностью. Высокая способность к набуханию не позволяет использовать материал в качестве сорбента. Для уменьшения степени набухания дополнительно провели обработку полимера с помощью поли(винилхлорида) (*I*), при этом степень дополнительной функционализации составила 8%, степень набухания снизилась до 90% при рН 2. При нагревании масса продукта изменяется в 2 стадии (рис. 2). Первая стадия потери массы заканчивается при 300°C и обусловлена, вероятно, удалением адсорбированных воды, хлористого водорода и димеров *N*-винилимидазола. Вторая (основная стадия потери массы) начинается с 300°C и обусловлена разрушением макромолекулярной цепи.

Основным механизмом сорбции поли(*N*-винилимидазола) является образование комплексов с переходными металлами [9, 10]. Сшивка поли(*N*-винилимидазола) с использованием 1,4-бис(бромметил)бензола и поли(винилхлорида) приводит к формированию в составе материала фрагментов кватерни-

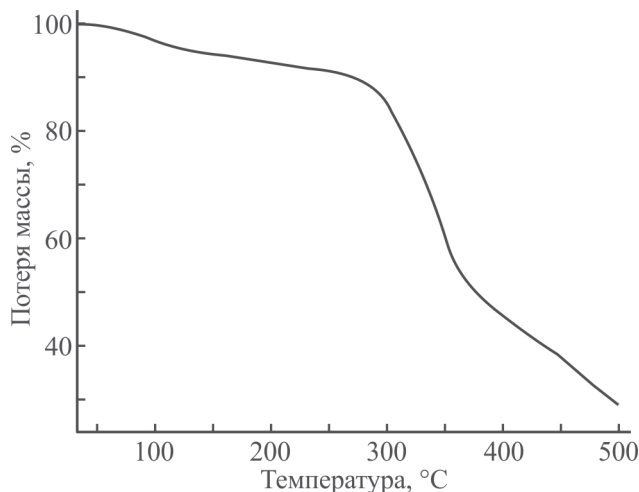


Рис. 2. Термограмма поли(*N*-винилимидазола), сшитого 1,4-бис(бромметил)бензолом, с последующей дополнительной обработкой поли(винилхлоридом).

зированного имидазола, являющихся анионообменными центрами (I). Таким образом, реализованная в настоящей работе сшивка поли(N-винилимидазола) выполняет двойную функцию: препятствует растворению материала в кислой среде и за счет химической трансформации имидазолильных фрагментов создает возможность сорбции комплексных анионов металлов не за счет комплексообразования, а по анионообменному механизму.

Характеристику селективности по отношению к Pd(II) и Au(III) сшитым поли(N-винилимидазолом) в присутствии переходных металлов проводили из солянокислых растворов. В наибольшей степени сорбентом извлекаются Au(III) и Pd(II), сорбция меди(II), Cd(II), Co(II), Ni(II) и Zn(II) сшитым поли(N-винилимидазолом) практически полностью подавляется (рис. 3). Наибольшее мешающее влияние на сорбцию Au(III) и Pd(II) из 2 М и 3 М HCl оказывают Cd(II) и Zn(II), однако их сорбция не превышает 0.05 ммоль·г⁻¹. Наиболее вероятным механизмом сорбции Pd(II) и Au(III), которые в растворе находятся в виде хлоридных комплексов [PdCl₄]²⁻ и [AuCl₄]⁻, является их электростатическое взаимодействие с катионными центрами сшитого поли(N-винилимидазола). В пользу этого свидетельствует тот факт, что Cd(II) и Zn(II) в сильноокислых средах также в определенной степени извлекаются сшитым поли(N-винилимидазолом) вследствие устойчивости их хлоридных комплексов.

Сравнение значений констант устойчивости комплексов Co(II), Cu(II) и Cd(II) с поли(N-винилимидазолом) [9] позволяет высказать предположение о значительном вкладе ионного обмена в процесс сорбции. В случае немодифицированного поли(N-

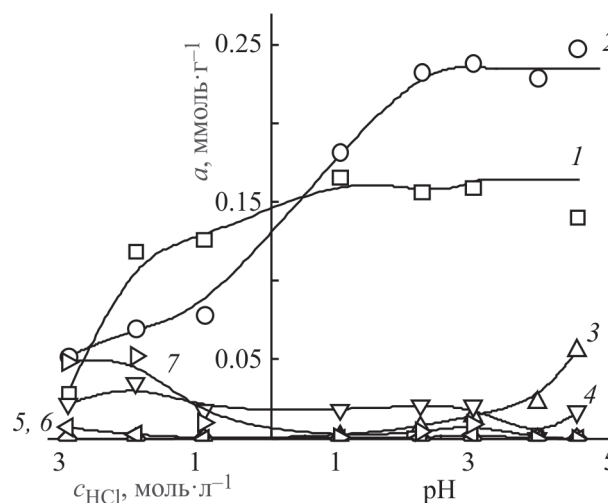


Рис 3. Влияние кислотности среды на сорбцию: 1 — Pd(II), 2 — Au(III), 3 — Cu(II), 4 — Cd(II), 5 — Co(II), 6 — Ni(II), 7 — Zn(II) — при их совместном присутствии в солянокислых растворах сшитым поли(N-винилимидазолом).

Масса сорбента 0.0200 г, исходная концентрация ионов металлов $1 \cdot 10^{-4}$ моль·л⁻¹, объем раствора 50.0 мл.

винилимидазола) имидазольные фрагменты образуют более прочные комплексные частицы с Co(II) и Cu(II), чем с Cd(II). В случае сшитого поли(N-винилимидазола) при значениях pH 1–3 наблюдается обратное, в большей степени происходит сорбция Cd(II). Это может быть объяснено способностью Cd(II) образовывать стабильные хлоридные комплексные анионы, которые могут участвовать в ионном обмене.

Наибольшая селективность по отношению к Au(III) по сравнению с Pd(II) в присутствии ряда

Таблица 1

Коэффициенты селективности Au(III) и Pd(II) по отношению к сопутствующим ионам металлов сорбентом на основе сшитого 1,4-бис(бромметил)бензолом поли(N-винилимидазола)

Кислотность раствора	$K_{\text{Au(III)/Me(II)}}$						$K_{\text{Pd(II)/Me(II)}}$	
	Pd(II)	Cu(II)	Cd(II)	Co(II)	Ni(II)	Zn(II)	Cd(II)	Zn(II)
c_{HCl} , моль л ⁻¹ :								
3	1.68		1.79		6.56	0.81	1.07	0.48
2	0.53	>10 ³	1.53	>10 ³	31.4	1.12	2.88	2.11
1	0.38		4.15		>10 ³	8.62	10.8	22.5
pH:								
0.99	0.96	343	18.8		1612	554	19.5	576
2.20	2.07	100	32.1		408	205	15.5	99.2
2.96	2.62	61.0	40.9	>10 ³		104	15.6	39.9
3.91	2.76	45.8	>10 ³				>10 ³	>10 ³
4.50	4.26	27.2	96.1			>10 ³	22.5	

Таблица 2

Степень десорбции (*D*, %) Pd(II) и Au(III)
в присутствии 1%-ного раствора тиомочевины
в 3 моль·л⁻¹ HCl

Кислотность исходного сорбционного раствора	<i>D</i> , %	
	Pd(II)	Au(III)
<i>c</i> HCl, моль·л ⁻¹ :		
3		
2	100	100
1		
pH:		
0.99	100	76
2.20–4.50	100	65

других ионов металлов реализуется в интервале pH от 2.20 до 4.5. Селективность по отношению Au(III) и Pd(II) значительно больше, чем к Cu(II), Cd(II), Co(II), Ni(II) и Zn(II) (табл. 1). Такое свойство сорбента может быть использовано для селективного концентрирования благородных металлов из природных объектов.

Для десорбции ионов благородных металлов могут быть использованы растворы минеральных кислот, тиомочевины, тиосульфатов, тиоцианатов [11]. Наиболее широко в данных целях применяются растворы HCl и тиомочевины разной концентрации при различных мольных соотношениях [12]. В настоящей работе для десорбции ионов металлов использовали: 3.5 М HCl, 1%-ный раствор тиомочевины в 2 М и 3 М HCl [13, 14]. Установлено, что при использовании в качестве регенерантов 3.5 М HCl и 1%-ного раствора тиомочевины в 2 М HCl количественная десорбция Pd(II) и Au(III) не достигается. При использовании 1%-ного раствора тиомочевины в 3 моль·л⁻¹ HCl десорбция Pd(II) является количественной во всем исследуемом диапазоне кислотности среды (табл. 2). Однако Au(III) после сорбции из растворов с pH ≥ 1 количественно не десорбируется. Оптимизация состава регенеранта (выбор минимальных концентраций тиомочевины и кислоты, обеспечивающих количественную десорбцию) требует дальнейших исследований.

Выводы

Разработан метод получения сорбционного материала на основе поли(*N*-винилимидазола) путем кватернизирующей сшивки полимера 1,4-бис(бромметил)бензолом и поли(винилхлоридом). В результате полимераналогичного превращения донорные

имидазольные центры эквивалентно превращены в катионные центры с общей степенью кватернизации 70%. Показана возможность использования сорбента для селективного извлечения Pd(II) и Au(III) из многокомпонентных растворов.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина в соответствии с программой стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Информация о вкладе авторов

К. Я. Кузнецова и О. Д. Якурнова исследовали селективность по отношению к ионам металлов сшитым поли(*N*-винилимидазолом); Ю. С. Петрова исследовала десорбцию ионов металлов; Д. А. Казанцев и А. В. Пестов осуществили синтез и идентификацию исследуемых материалов; Л. К. Неудачина внесла основной вклад в обсуждение селективных свойств сорбента.

Информация об авторах

Кузнецова Ксения Ярославовна, ассистент кафедры аналитической химии и химии окружающей среды ИЕиМ УрФУ

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5351-1467>

Якурнова Олеся Дмитриевна

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9614-4886>

Казанцев Даниил Алексеевич

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8648-3395>

Петрова Юлия Сергеевна, к.х.н., зав кафедрой аналитической химии и химии окружающей среды ИЕиМ УрФУ

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8282-5097>

РИНЦ: SPIN-код: 1741-6237, AuthorID: 694965

Пестов Александр Викторович, к.х.н., с.н.с. лаборатории органических материалов ИОС УрО РАН

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4270-3041>

РИНЦ: AuthorID: 151888

Неудачина Людмила Константиновна, к.х.н., доцент кафедры аналитической химии и химии окружающей среды ИЕиМ УрФУ

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8745-2848>

РИНЦ: SPIN-код: 9941-2874, AuthorID: 50889

Список литературы

- [1] Economidou M., Mistry N., Wheelhouse K., Lindsay D. Palladium extraction following metal-catalyzed reaction: Recent advances and applications in the pharmaceutical industry // *Org. Process Res. Dev.* 2023. V. 27. P. 1585–1615.
<https://doi.org/10.1021/acs.oprd.3c00210>
- [2] Сипкина Е. И. Сорбционные материалы для извлечения платины (IV) из хлоридных растворов // *Изв. вузов. Прикл. химия и биотехнол.* 2015. № 6. С. 7–19.
<https://www.elibrary.ru/vjjywt>
- [3] Алифханова Л. М. к., Лопунова К. Я., Марчук А. А., Петрова Ю. С., Пестов А. В., Неудачина Л. К. Особенности сорбционного концентрирования ионов благородных металлов сульфозетилированными аминополимерами // *Журн. неорг. химии.* 2021. Т. 66. № 6. С. 814–821.
<https://doi.org/10.31857/S0044457X21060027>
[Alifkhanova L. M. k., Lopunova K. Ya., Marchuk A. A., Petrova Yu. S., Pestov A. V., Neudachina L. K. Features of sorption preconcentration of noble metal ions with sulfoethylated amino polymers // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2021. V. 66. N 6. P. 909–915.
<https://doi.org/10.1134/S0036023621060024>].
- [4] Tu Z., Lu S., Chang X., Li Z., Hu Z., Zhang L., Tian H. Selective solid-phase extraction and separation of trace gold, palladium and platinum using activated carbon modified with ethyl-3-(2-aminoethylamino)-2-chlorobut-2-enoate // *Microchim. Acta.* 2011. V. 173. N 1. P. 231–239.
<https://doi.org/10.1007/s00604-011-0552-0>
- [5] Corazza M. Z., Ribeiro S. R., Segatelli M. G., Tarley C. R. T. Study of cross-linked poly(methacrylic acid) and polyvinylimidazole as selective adsorbents for on-line preconcentration and redox speciation of chromium with flame atomic absorption spectrometry determination // *Microchem. J.* 2014. V. 117. P. 18–26.
<https://doi.org/10.1016/j.microc.2014.05.016>
- [6] Segatelli M. G., Santos V. S., Presotto A. B. T., Yoshida I. V. P., Tarley C. R. T. Cadmium ion-selective sorbent preconcentration method using ion imprinted poly(ethylene glycol dimethacrylate-covinylimidazole) // *React. Funct. Polym.* 2010. V. 70. P. 325–333.
<https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2010.02.006>
- [7] Мархол М. Ионнообменники в аналитической химии. Свойства и применение в неорганической химии. В 2 ч. Ч. 1. М.: Мир, 1985. С. 41.
- [8] Hakamatani T., Asayama S., Kawakami H. Synthesis of alkylated poly(1-vinylimidazole) for a new pH-sensitive DNA carrier // *Nucleic Acids Symp. Ser.* 2008. V. 52. N 1. P. 677–678.
<https://doi.org/10.1093/nass/nrn342>
- [9] Pekel N., Guven O. Investigation of complex formation between poly(N-vinyl imidazole) and various metal ions using the molar ratio method // *Colloid. Polym. Sci.* 1999. V. 277. N 6. P. 570–573.
<https://doi.org/10.1007/s003960050426>
- [10] Annenkov V. V., Danilovtseva E. N., Saraev V. V., Mikhaleva A. I. Complexation of copper(II) ions with imidazole-carboxylic polymeric systems // *J. Polym. Sci. Part A: Polym. Chem.* 2003. V. 41. N 14. P. 2256–2253.
<https://doi.org/10.1002/pola.10769>
- [11] Fujiwara K., Ramesh A., Maki T., Hasegawa H., Ueda K. Adsorption of platinum (IV), palladium (II) and gold (III) from aqueous solutions onto L-lysine modified crosslinked chitosan resin // *J. Hazard. Mater.* 2007. V. 146. P. 39–50.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.11.049>
- [12] Parodi A., Vincent T., Pilsniak M., Trochimczuk A., Guibal E. Palladium and platinum binding on an imidazol containing resin // *Hydrometallurgy.* 2008. V. 92. N 1–2. P. 1–10.
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.02.005>
- [13] Капитанова Е. И., Синельщикова А. Р., Петрова Ю. С., Землякова Е. О., Пестов А. В., Неудачина Л. К. Влияние степени сульфозетилирования полиэтиленimina на селективность сорбции палладия(II) из бинарных растворов // *Изв. АН. Сер. хим.* 2021. Т. 70. № 6. С. 1161–1166.
<https://elibrary.ru/wcjfc>
[Kapitanova E. I., Sinelshchikova A. R., Petrova Yu. S., Zemlyakova E. O., Pestov A. V., Neudachina L. K. Effect of the degree of sulfoethylation of polyethylenimine on the selectivity of sorption of palladium(II) from binary solutions // *Russ. Chem. Bull. (Int. Ed.)*. 2021. V. 70. N 6. P. 1161–1166.
<https://doi.org/10.1007/s11172-021-3199-y>].
- [14] Petrova Yu. S., Pestov A. V., Kapitanova E. I., Usoltseva M. K., Neudachina L. K. High-selective recovery of palladium by the N-(2-sulfoethyl)chitosan-based sorbent from the Pt(IV)-Pd(II) binary solution in a fixed-bed column // *Sep. Purif. Technol.* 2019. V. 213. P. 78–87.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.12.025>