

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

© К. Я. Кузнецова<sup>1</sup>, О. Д. Якурнова<sup>1</sup>, Д. А. Казанцев<sup>2</sup>, Ю. С. Петрова<sup>1</sup>,  
А. В. Пестов<sup>1,2</sup>, Л. К. Неудачина<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> 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 двухстадийная кватернизующая сшивка поли(Н-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: полиг(Н-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

сыре 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*-венилимидазол), 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*-венилимидазола) для селективного извлечения Pd(II) и Au(III) из растворов, содержащих другие переходные металлы.

### Экспериментальная часть

Поли(*N*-венилимидазол) (99%, Sigma-Aldrich, кат. № 235466-100G), 1,4-бис(бромметил)бензол (98%, Sigma-Aldrich, кат. № S36308-100MG), поли(венилхлорид) (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 PCN-OEA 1108. Содержание брома определяли меркуриметрическим титрованием.<sup>1</sup> 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<sup>-1</sup>. Термограммы регистрировали на дериватографе TGA/DSC 1 (Mettler Toledo) при скорости нагрева 10 град·мин<sup>-1</sup> в среде аргона (высокой чистоты, ООО «ГТС»), скорость подачи газа 60 мл·мин<sup>-1</sup>.

Степень функционализации (СФ) поли(*N*-венилимидазола) рассчитывали по формуле

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

где (C/N)<sub>продукт</sub> и (C/N)<sub>поли(*N*-венилимидазол)</sub> — атомное отношение элементов углерода и азота в продукте и

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

Синтез сорбента осуществляли следующим образом: на первой стадии смесь 5.00 г поли(*N*-венилимидазола), 14.02 г 1,4-бис(бромметил)бензола, 7.34 г K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (х.ч., АО «ВЕКТОН») 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<sup>-1</sup>): 3392, 3082, 2938, 1651. Степень функционализации составила 62%.

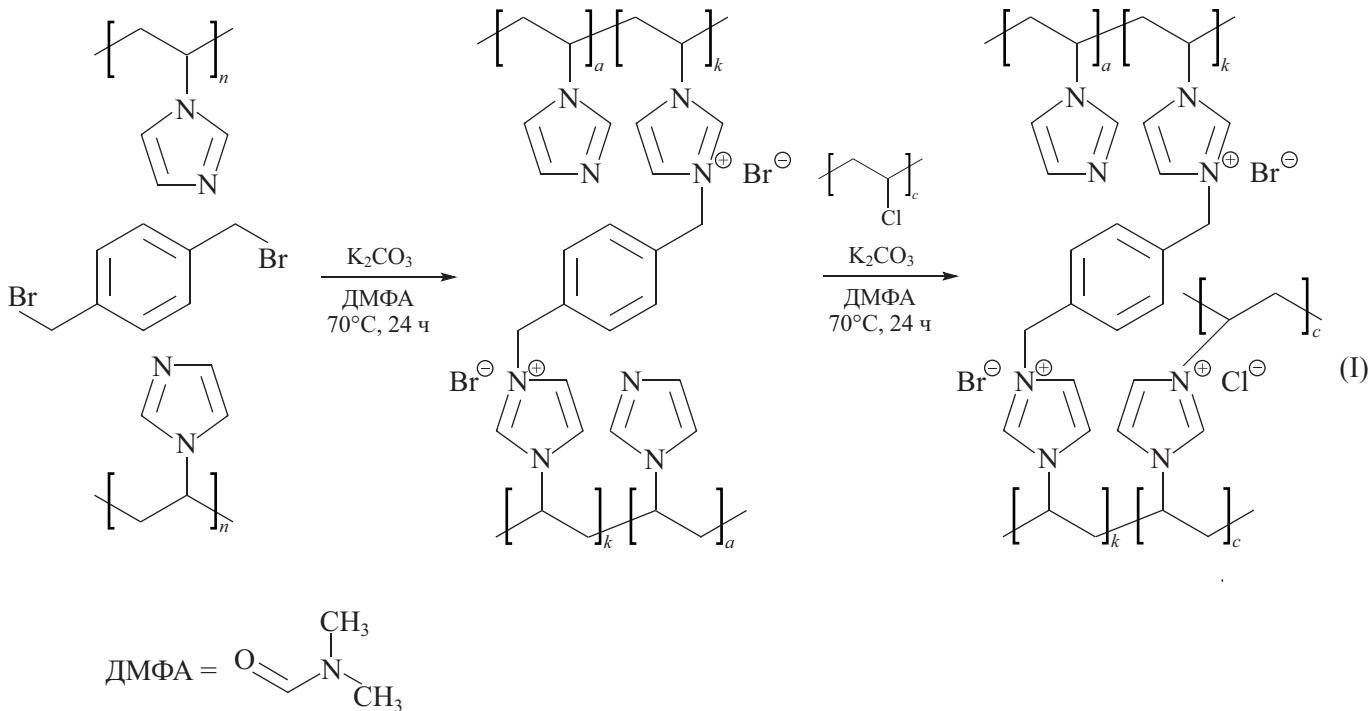
Полученный продукт был дополнительно модифицирован поли(венилхлоридом). Для этого смесь 14.07 г продукта первой стадии, 3.32 г поли(венилхлорида), 7.34 г сухого K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> и 50 мл N,N-диметилформамида перемешивали при 70°C в течение 24 ч. Модифицированный поли(венилхлоридом) полимер 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<sup>-1</sup>): 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<sup>-1</sup> 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 HNO<sub>3</sub> (65%, х.ч., ООО ОРТ «Химреактивы») и HCl (32%, х.ч., ООО ОРТ «Химреактивы») (*c*<sub>HNO<sub>3</sub></sub>:*c*<sub>HCl</sub> = 1:3), раствор упаривали досуха, добавляли 5 мл концентрированной HCl (32%, х.ч., ООО ОРТ «Химреактивы») и 0.10 г NaCl (х.ч., АО «ВЕКТОН»), 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.

<sup>1</sup> 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 «ВЕКТОН») в точном объеме дистиллированной воды.

Сорбцию  $\text{Pd(II)}$  и  $\text{Au(III)}$  в присутствии  $\text{Cu(II)}$ ,  $\text{Co(II)}$ ,  $\text{Ni(II)}$ ,  $\text{Zn(II)}$  и  $\text{Cd(II)}$  сшитым поли(*N*-винилимидазолом) изучали в статических условиях методом ограниченного объема при исходной концентрации ионов металлов  $1 \cdot 10^{-4}$  моль·л<sup>-1</sup> из солянокислых растворов в интервале pH 1.0–5.0 (концентрация свободных хлорид-ионов в диапазоне pH 2.0–5.0 составляла  $\sim 0.05$  моль·л<sup>-1</sup>), а также из растворов HCl концентрациями 1, 2 и 3 моль·л<sup>-1</sup>. 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 ОРТ «Химреактивы») и 1 М NaOH (х.ч., ООО «Полихим»). Полученные растворы добавляли к сорбенту и оставляли на 5 сут при периодическом перемешивании.



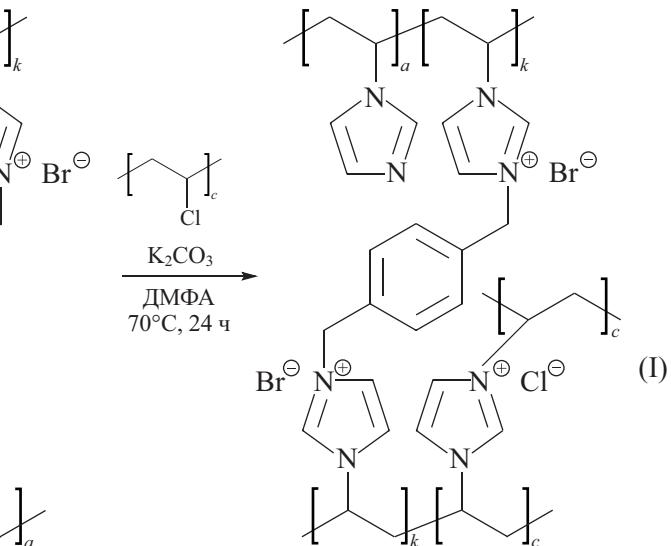
Реакция алкилирования поли(*N*-винилимидазола) протекает эффективно, степень кватернизации достигает 62%, при этом полимер теряет растворимость в водных растворах, что указывает на формирование сетчатой структуры. Большего значения степени кватернизации достичь не удается, по-видимому, из-за пространственных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

Десорбцию ионов металлов проводили в течение 24 ч после их сорбции в статических условиях 25.0 мл 1%-ного раствора тиомочевины (х.ч., ООО «Аделит») в 3 моль·л<sup>-1</sup> HCl (х.ч., ООО ОРТ «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  $K_{\text{M1/M2}}$  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 кватернизированной соли имидазола [8]. В настоящей работе в качестве сшивающего реагента использовали реакционноспособный 1,4-бис(бромметил)бензол:



метиленфенилиденового сшивающего агента. В ИК-спектре (рис. 1, I) присутствуют полосы поглощения при 3134 и 2938 см<sup>-1</sup>, 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) дополн-

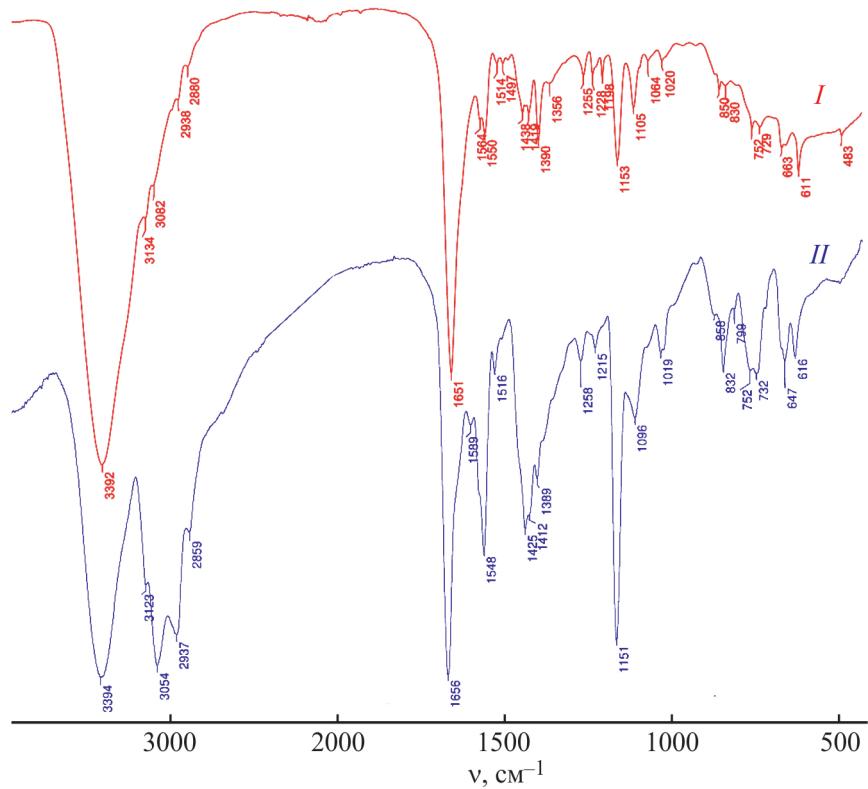


Рис. 1. ИК-Фурье-спектры отражения поли(*N*-винилимидазола), сшитого 1,4-бис(бромметил)бензолом (*I*), и продукта его модификации поли(винилхлоридом) (*II*).

нительно возникают полосы поглощения при 3082 и 1651  $\text{cm}^{-1}$ , отвечающие валентным колебаниям связей C—H и скелетным колебаниям C=C бензольного цикла соответственно.

Благодаря формированию сетчатой структуры после обработки поли(*N*-винилимидазола) 1,4-бис(бромметил)бензолом продукт не растворяется во всем диапазоне pH, но демонстрирует высокую степень набухания 385% при pH 2. Это, по-видимому, обусловлено значительным увеличением гидрофильтрости 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 pH 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-

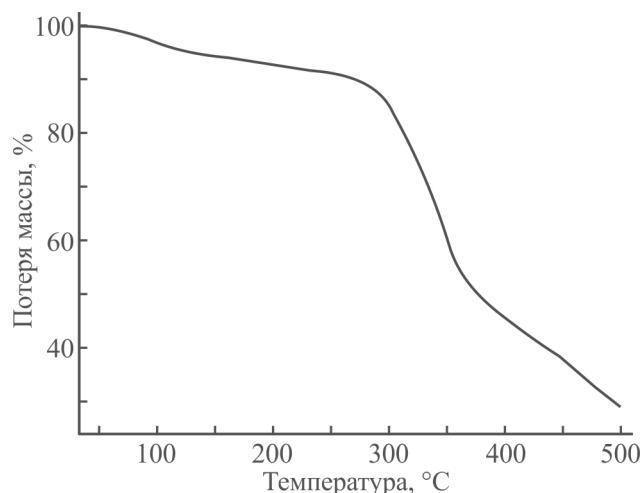


Рис. 2. Термограмма поли(*N*-винилимидазола), сшитого 1,4-бис(бромметил)бензолом, с последующей дополнительной обработкой поли(винилхлоридом).

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

Характеристику селективности по отношению к Pd(II) и Au(III) сшитым поли(*N*-венилимида) 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*-венилимида) 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<sup>-1</sup>. Наиболее вероятным механизмом сорбции Pd(II) и Au(III), которые в растворе находятся в виде хлоридных комплексов [PdCl<sub>4</sub>]<sup>2-</sup> и [AuCl<sub>4</sub>]<sup>-</sup>, является их электростатическое взаимодействие с катионными центрами сшитого поли(*N*-венилимида). В пользу этого свидетельствует тот факт, что Cd(II) и Zn(II) в солянокислых средах также в определенной степени извлекаются сшитым поли(*N*-венилимида) вследствие устойчивости их хлоридных комплексов.

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

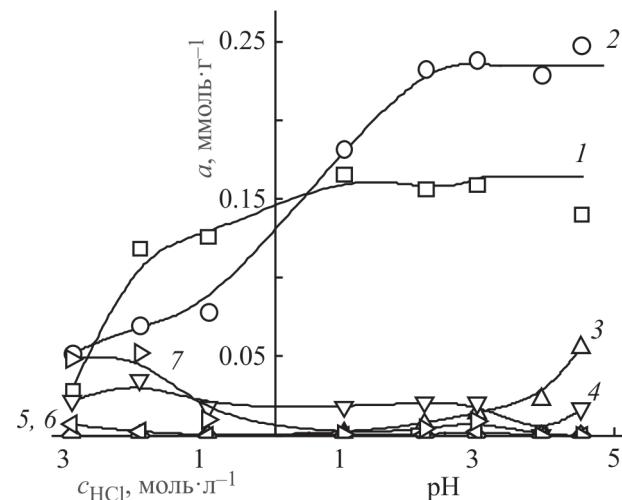


Рис. 3. Влияние кислотности среды на сорбцию: 1 — Pd(II), 2 — Au(III), 3 — Cu(II), 4 — Cd(II), 5 — Co(II), 6 — Ni(II), 7 — Zn(II) — при их совместном присутствии в солянокислых растворах сшитым поли(*N*-венилимида).

Масса сорбента 0.0200 г, исходная концентрация ионов металлов 1·10<sup>-4</sup> моль·л<sup>-1</sup>, объем раствора 50.0 мл.

венилимида) имидазольные фрагменты образуют более прочные комплексные частицы с Co(II) и Cu(II), чем с Cd(II). В случае сшитого поли(*N*-венилимида) 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*-венилимида)

Кислотность раствора	$K_{\text{Au(III)}/\text{Me(II)}}$						$K_{\text{Pd(II)}/\text{Me(II)}}$	
	Pd(II)	Cu(II)	Cd(II)	Co(II)	Ni(II)	Zn(II)	Cd(II)	Zn(II)
$c_{\text{HCl}}, \text{моль л}^{-1}$ :								
3	1.68		1.79		6.56	0.81	1.07	0.48
2	0.53	>10 <sup>3</sup>	1.53		31.4	1.12	2.88	2.11
1	0.38		4.15		>10 <sup>3</sup>	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			104	15.6	39.9
3.91	2.76	45.8	>10 <sup>3</sup>				>10 <sup>3</sup>	>10 <sup>3</sup>
4.50	4.26	27.2	96.1					22.5

**Таблица 2**

Степень десорбции ( $D, \%$ ) Pd(II) и Au(III)  
в присутствии 1%-ного раствора тиомочевины  
в 3 моль·л<sup>-1</sup> HCl

Кислотность исходного сорбционного раствора	$D, \%$	
	Pd(II)	Au(III)
$c_{\text{HCl}}, \text{моль}\cdot\text{л}^{-1}$ :		
3	100	100
2		
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, тиосульфанатов, 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 M HCl, 1%-ный раствор тиомочевины в 2 M и 3 M HCl [13, 14]. Установлено, что при использовании в качестве регенерантов 3.5 M HCl и 1%-ного раствора тиомочевины в 2 M HCl количественная десорбция Pd(II) и Au(III) не достигается. При использовании 1%-ного раствора тиомочевины в 3 моль·л<sup>-1</sup> 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 кватернизующей сшивки полимера 1,4-бис(бромметил)бензолом и поли(винилхлоридом). В результате полимераналогичного превращения донорные

имидаольные 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 сшиптым 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 ИЕНИМ 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 ИЕНИМ 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 ИЕННиМ 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] *Синкина 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/vjyjywt>
- [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 сульфоэтилированными 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\].](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.* Ионообменники 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., Pilisniak 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 сульфоэтилирования полиэтиленимина на селективность сорбции палладия(II) из бинарных растворов // Изв. АН. Сер. хим. 2021. Т. 70. № 6. С. 1161–1166.  
<https://elibrary.ru/wcjfcm>  
[*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\].](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>