

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 669.22:544.723

doi: 10.17308/sorpchrom.2025.25/13283

Сорбция серебра (I) в присутствии палладия (II) и золота (III) из солянокислых растворов поли(N-винилимидазолом), сшитым 1,4-бис(бромметил)бензолом

Ксения Ярославовна Кузнецова^{1✉}, Юлия Сергеевна Петрова¹,
Даниил Алексеевич Казанцев², Александр Викторович Пестов^{1,2},
Людмила Константиновна Неудачина¹

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, lopunova.97@mail.ru[✉]

²Институт органического синтеза им. И.Я. Постовского УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Исследован процесс сорбции серебра (I) материалом на основе поли(N-винилимидазола), сшитого 1,4-бис(бромметил)бензолом из солянокислых растворов различного состава, в том числе в присутствии золота (III) и палладия (II). Исследование проводили методом ограниченного объема из растворов с концентрацией хлороводородной кислоты от 1 до 3 моль/дм³, при исходной концентрации ионов металлов $5 \cdot 10^{-5}$ – $1 \cdot 10^{-4}$ моль/дм³ ($m_{\text{сорбента}} = 0.0200$ г, $V_{\text{раствора}} = 50.0$ см³). Содержание ионов металлов в растворах определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии. В результате проведенных исследований установлено, что поли(N-винилимидазолом) серебро (I) извлекается в наибольшей степени из 1 моль/дм³ HCl. При этом селективное извлечение серебра (I) в присутствии золота (III) и палладия (II) поли(N-винилимидазолом) в статических условиях не достигается. Показано, что для достижения равновесия сорбции в системах «раствор солей благородных металлов – сорбент» достаточно 120 минут контакта фаз. Использование в качестве регенерантов 3.5 моль/дм³ хлороводородной кислоты, 0.1 моль/дм³ раствора аммиака и 1 %-го раствора тиомочевина в 2 моль/дм³ HCl не позволяет достичь количественной десорбции металлов с сорбента (максимальное значение степени десорбции $\leq 80\%$).

Динамика сорбции изучена путем пропускания раствора с концентрацией благородных металлов $5 \cdot 10^{-5}$ моль/дм³ через концентрирующий патрон, содержащий 0.1000 г сорбента. Скорость пропускания раствора составляла 2 см³/мин. Установлено, что в данных условиях исследуемый сорбент совместно извлекает серебро (I) и золото (III) из 1 моль/дм³ HCl. Для их разделения предложен метод последовательного элюирования, включающий использование раствора роданида аммония с концентрацией 0.5 моль/дм³, а затем 1 %-ого раствора тиомочевина в 2 моль/дм³ HCl. Показано, в данных условиях достигается разделение серебра (I) и золота (III). Однако, подбор оптимального элюента для количественной десорбции золота с поли(N-винилимидазола) требует дополнительных исследований.

Ключевые слова: сорбция, палладий, золото, серебро, солянокислые растворы, поли(N-винилимидазол)

Для цитирования: Кузнецова К.Я., Петрова Ю.С., Казанцев Д.А., Пестов А.В., Неудачина Л.К. Сорбция серебра (I) в присутствии палладия (II) и золота (III) из солянокислых растворов поли(N-винилимидазолом), сшитым 1,4-бис(бромметил)бензолом // Сорбционные и хроматографические процессы. 2025. Т. 25, № 4. С. 556-566. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/13283>

Original article

Sorption of silver (I) in the presence of palladium (II) and gold (III) from hydrochloric acid solutions by poly(N-vinylimidazole) cross-linked with 1,4-bis(bromomethyl)benzene

Kseniia Ya. Kuznetsova^{1✉}, Julia S. Petrova¹, Daniil A. Kazancev²,
Alexander V. Pestov^{1,2}, Ludmila K. Neudachina¹

¹Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation, lopunova.97@mail.ru[✉]

© Кузнецова К. Я., Петрова Ю. С., Казанцев Д. А., Пестов А. В., Неудачина Л. К., 2025

²I.Ya. Postovsky Institute of Organic Synthesis of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IOS UB RAS), Ekaterinburg, Russian Federation

Abstract. The sorption of silver (I) by a material based on poly(N-vinylimidazole) crosslinked with 1,4-bis(bromomethyl) has been studiedbenzene from hydrochloric acid solutions of various compositions, including in the presence of gold (III) and palladium (II). The study was carried out using a limited volume method from solutions with a concentration of hydrochloric acid from 1 to 3 mol/dm³, at an initial concentration of metal ions $5 \cdot 10^{-5}$ - $1 \cdot 10^{-4}$ mol/dm³ (sorbent – 0.0200 g, Solution – 50.0 cm³). The metal ion content in the solutions was determined by atomic absorption spectroscopy. As a result of the conducted studies, it was found that poly(N-vinylimidazole) silver (I) is extracted to the greatest extent from 1 mol/dm³ HCl. In this case, selective extraction of silver (I) in the presence of gold (III) and palladium (II) by poly(N-vinylimidazole) under static conditions is not achieved. It is shown that 120 minutes of phase contact is sufficient to achieve sorption equilibrium in the noble metal salt solution – sorbent systems. The use of 3.5 mol/dm³ hydrochloric acid, 0.1 mol/dm³ ammonia solution and 1% thiourea solution in 2 mol/dm³ HCl as regenerants does not allow achieving quantitative desorption of metals from the sorbent (the maximum value of the degree of desorption is < 80%).

The dynamics of sorption was studied by passing a solution with a concentration of noble metals $5 \cdot 10^{-5}$ mol/dm³ through a concentrating cartridge containing 0.1000 g of sorbent. The flow rate of the solution was 2 cm³/min. It was found that under these conditions, the sorbent under study jointly extracts silver (I) and gold (III) from 1 mol/dm³ HCl. To separate them, a sequential elution method is proposed, including the use of an ammonium rhodanide solution with a concentration of 0.5 mol/dm³, followed by a 1% thiourea solution in 2 mol/dm³ HCl. It is shown that the separation of silver (I) and gold (III) is achieved under these conditions. However, the selection of the optimal eluent for quantitative desorption of gold from poly(N-vinylimidazole) requires additional research.

Keywords: sorption, palladium, gold, silver, hydrochloric acid solutions, poly(N-vinylimidazole)

For citation: Kuznetsova K.Ya., Petrova J.S., Kazancev D.A., Pestov A.V., Neudachina L.K. Sorption of silver (I) in the presence of palladium (II) and gold (III) from hydrochloric acid solutions by poly(N-vinylimidazole) cross-linked with 1,4-bis(bromomethyl)benzene. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy. 2025. 25(4): 556-566.* (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/13283>

Введение

Серебро, палладий и золото являются востребованными металлами в различных областях промышленности [1, 2], однако в связи с деятельностью человека они могут попадать в окружающую среду и накапливаться в ней [3–6]. Поэтому необходимо контролировать содержание данных металлов в технологических и природных объектах. В настоящее время активно развиваются методы переработки вторичного сырья (радиоэлектронного лома, техногенных отходов), которое содержит серебро, палладий и золото в сравнительно малых количествах. Поэтому для селективного извлечения благородных металлов из такого сырья применяют методы разделения и концентрирования. Преимуществом использования такого метода извлечения аналитов по сравнению с выщелачиванием и экстракцией является использование нетоксичных реагентов и сравнительно низкий их расход.

Серебро (I), золото (III) и палладий (II) способны образовывать устойчивые комплексы с сорбентами, содержащими в своем составе донорные атомы азота и/или серы. Исходя из этого, перспективными материалами для селективного извлечения ионов благородных металлов являются комплексообразующие сорбенты [7-9]. Однако, в промышленных растворах, серебро (I), золото (III) и палладий (II) находятся в виде хлоридных комплексов [10], что определяет перспективность использования для их концентрирования и различных анионообменных материалов [11-13].

Ранее нами исследована селективность сорбции золота (III) и палладия (II) сорбентом на основе поли(N-винилимидазола), сшитого 1,4-бис(бромметил)бензолом [14]. Кватернизирующая сшивка поли(N-винилимидазола) способствует формированию в структуре сорбента анионообменных центров, что позволяет проводить концентрирование ионов благородных металлов в виде их хлоридных

комплексов за счет электростатического взаимодействия. Показано, что исследуемый сорбент проявляет высокую селективность по отношению к палладию (II) и золоту (III) при сорбции из солянокислых растворов в присутствии Cu (II), Co (II), Ni (II), Zn (II) и Cd (II). Однако селективные свойства сорбента по отношению к другим ионам благородных металлов, в том числе к серебру (I), ранее не исследовались. Тем не менее серебро часто сопутствует золоту и палладию в реальных объектах. Поэтому перед разработкой гибридных сорбционно-спектроскопических методик определения благородных металлов в составе геологических объектов или вторичного сырья необходимо исследовать селективные свойства материалов, которые могут быть использованы для разделения и концентрирования на стадии пробоподготовки.

Цель работы – установление закономерностей сорбции серебра (I) в присутствии золота (III) и палладия (II) из солянокислых растворов различного состава поли(N-винилимидазолом), сшитым 1,4-бис(бромметил)бензолом.

Экспериментальная часть

В качестве сорбционного материала исследован поли(N-винилимидазол), сшитый 1,4-бис(бромметил)бензолом, со степенью кватернизации 70%. Синтез и идентификация сорбента описаны в [14].

Исходные растворы серебра (I) готовили растворением точных навесок AgNO_3 (х.ч., АО «ВЕКТОН») в деионизованной воде (Milli-Q Academic (Millipore, США)). Растворы хлоридов Pd (II) и Au (III) с концентрацией 1 мг/см³ были подготовлены из соответствующих металлов путем растворения в царской водке.

Сорбцию серебра (I) из индивидуальных растворов, а также в присутствии золота (III) и палладия (II) сшитым поли(N-винилимидазолом) изучали в статических условиях методом ограниченного объема. Эксперименты проводились при исходной концентрации ионов металлов

$5 \cdot 10^{-5}$ или $1 \cdot 10^{-4}$ моль/дм³ из растворов с концентрацией HCl 3, 2 и 1 моль/дм³. Растворы объемом 50.0 см³ добавляли к 0.0200 г сорбента и оставляли на 3 суток при периодическом перемешивании.

Десорбцию ионов металлов проводили в течение суток после их сорбции сшитым поли(N-винилимидазолом) в статических условиях, используя 25.0 см³ 3.5 моль/дм³ HCl, 0.1 моль/дм³ аммиака и 1 %-го раствора тиомочевина в 2 моль/дм³ HCl.

Кинетика сорбции ионов металлов изучалась при постоянном перемешивании с помощью перемешивающего устройства LOIP LS-110 (АО «ЛОИП»), со скоростью 160 об/мин. По истечении 10, 30, 60, 120, 180, 240, 300 минут контакта сорбента и раствора, фазы разделяли фильтрованием. Исходная концентрация ионов благородных металлов в растворе – $5 \cdot 10^{-5}$ моль/дм³, $m_{\text{сорбента}} = 0.0200$ г, $V_{\text{раствора}} = 50.0$ см³.

Содержание ионов металлов в растворах определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии с пламенной атомизацией на спектрометре Solaar M6 (Thermo Scientific). Коэффициенты селективности $K_{\text{Me1/Me2}}$ рассчитывали как отношение коэффициентов распределения ионов Me₁ и мешающего иона Me₂ между раствором и поли(N-винилимидазолом).

Исследование сорбции Ag (I) из индивидуальных растворов и в присутствии Au (III) поли(N-винилимидазолом), сшитым 1,4-бис(бромметил)бензолом, в динамических условиях проводили путем пропускания раствора с концентрацией HCl 1 моль/дм³ со скоростью 2 см³/мин через концентрирующий патрон с 0.1000 г сорбента. Исходная концентрация ионов благородных металлов – $5 \cdot 10^{-5}$ моль/дм³. Выходящий из патрона раствор собирали порциями по 10.0 см³. По результатам эксперимента строили динамические выходные кривые. Динамическую обменную емкость (ДОЕ) (мкмоль/г) сорбента рассчитывали по формуле:

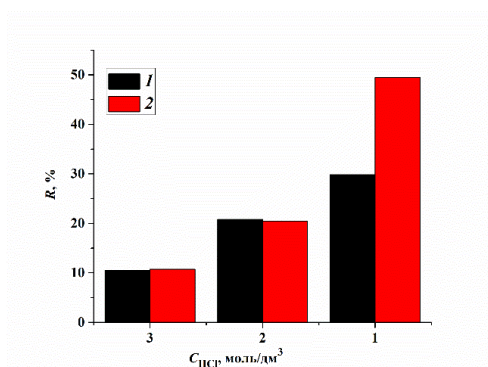


Рис. 1. Зависимость степени извлечения серебра (I) сшитым поли(N-винилимидазолом) от концентрации соляной кислоты. Исходная концентрация серебра (I): 1 – $1 \cdot 10^{-4}$ моль/дм³; 2 – $1 \cdot 10^{-5}$ моль/дм³. $m_{\text{сорбента}} = 0.0200$ г, $V_{\text{раствора}} = 50.0$ см³.

Fig. 1. Dependence of the degree of silver extraction (I) by crosslinked poly(N-vinylimidazole) on the concentration of hydrochloric acid. The initial concentration of silver (I): 1 – $1 \cdot 10^{-4}$ mol/dm³; 2 – $1 \cdot 10^{-5}$ mol/dm³. sorbent – 0.0200 g, Solution – 50.0 cm³.

$$\text{ДОЕ} = 1000 \left(\frac{\sum (C_0 - C) \cdot V}{M \cdot m} \right), \quad (1)$$

где C_0 и C – концентрации иона металла в водной фазе до и после сорбции, соответственно, мг/дм³; V – объем раствора, пропущенного через патрон, дм³; m – масса сшитого поли(N-винилимидазола), г; M – молярная масса металла, г/моль.

Элюирование серебра (I) и золота (III) с сорбента осуществлялось путем пропускания регенеранта через патрон с сорбентом со скоростью 1–2 см³/мин. В качестве регенерантов исследованы: 0.5 и 1 моль/дм³ раствор роданида аммония, 2 и 3.5 моль/дм³ раствор хлороводородной кислоты и 1 %-ый раствор тиомочевины в 2 моль/дм³ HCl.

Обсуждение результатов

Исследование сорбции серебра (I) поли(N-винилимидазолом) из индивидуальных солянокислых растворов. Исследование селективности сорбции серебра (I) сшитым поли(N-винилимидазолом) проводили в статических условиях из растворов с концентрацией HCl 1-3 моль/дм³. На рисунке 1 приведены зависимости степени извлечения серебра (I) от концентрации HCl.

Установлено, что с уменьшением концентрации HCl от 3 до 1 моль/дм³, возрастает степень извлечения серебра (I) сшитым поли(N-винилимидазолом). Это

можно объяснить тем, что с уменьшением концентрации хлороводородной кислоты уменьшается конкурирующее влияние свободных хлорид-ионов, что способствует увеличению электростатического взаимодействия хлоридных комплексов серебра (I), с положительно заряженными атомами азота сорбента.

При уменьшении исходной концентрации серебра (I) увеличивается его степень извлечения из 1 моль/дм³ HCl, что закономерно, так как количество сорбционных центров в составе сорбента не меняется.

Исследование сорбции серебра (I) поли(N-винилимидазолом) из солянокислых растворов в присутствии золота (III) и палладия (II). Как правило, серебру в реальных объектах (например, в рудах, электронном ломе) сопутствуют золото и платиновые металлы. Поэтому важной задачей является исследование селективности сорбции серебра (I) из многокомпонентных солянокислых растворов.

Установлено, что при сорбции Ag (I) в присутствии Au (III), сорбентом из растворов с концентрацией HCl 2-3 моль/дм³ в наибольшей степени извлекается золото (III) (рис. 2а). Однако коэффициенты селективности $K_{Au(III)/Ag(I)}$, составившие 1.93 и 1.78 при концентрации HCl 2 и 3 моль/дм³, соответственно, в целом принимают невысокие значения. При

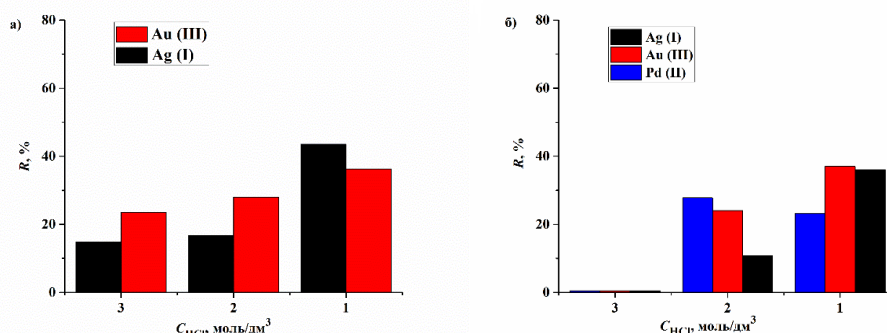


Рис. 2. Сорбция благородных металлов сшитым поли(N-винилимидазолом) при совместном присутствии в растворе (а – Ag (I), Au (III); б – Ag (I), Au (III), Pd (II)). Исходная концентрация ионов металлов – $5 \cdot 10^{-5}$ моль/дм³, $m_{\text{сорбента}} = 0.0200$ г, $V_{\text{раствора}} = 50.0$ см³.

Fig. 2. Sorption of precious metals by crosslinked poly(N-vinylimidazole) in the combined presence in solution (a – Ag(I), Au(III); b – Ag(I), Au(III), Pd(II)). The initial concentration of metal ions is $5 \cdot 10^{-5}$ mol/dm³, the sorbent is 0.0200 g, and the solution is 50.0 cm³.

Таблица 1. Значения коэффициентов селективности сорбции благородных металлов при их совместном присутствии в растворе, сшитым поли(N-винилимидазолом) при различной кислотности среды

Table 1. Values of the selectivity coefficients of sorption of noble metals in their combined presence in a solution crosslinked with poly(N-vinylimidazole) at different medium acidity

C_{HCl} , моль/дм ³	$K_{\text{Au(III)/Ag(I)}}$	$K_{\text{Au(III)/Pd(II)}}$	$K_{\text{Pd(II)/Ag(I)}}$
1	1.04	1.95	0.53
2	2.63	0.82	3.19

этом степени извлечения серебра (I) в присутствии золота (III) поли(N-винилимидазолом) сопоставимы со степенями извлечения при его сорбции из индивидуальных растворов. Из 1 моль/дм³ растворов HCl в наибольшей степени по сравнению с золотом (III) извлекается серебро (I).

При проведении сорбции из трехкомпонентной системы, содержащей Ag (I), Au (III), Pd (II), показано, что наибольшей степени извлечения серебра (I) исследуемым сорбентом отвечает концентрация HCl, равная 1 моль/дм³. Однако, в данных условиях разделение ионов благородных металлов не достигается (рис. 2б).

Степень извлечения исследуемых ионов металлов из растворов с концентрацией HCl 3 моль/дм³ значительно ниже по сравнению растворами с концентрацией HCl 1-2 моль/дм³. Это обусловлено конкурирующим влиянием свободных хлорид-ионов в растворе.

По полученным данным рассчитаны значения коэффициентов селективности, представленные в таблице 1.

В сопоставлении с литературными данными [12] видно, что поли(N-винилимидазолом) в меньшей степени извлекаются серебро (I) и палладий (II) при их совместном присутствии в растворе. Так, различные аниониты марки Purolite из 2 и 4 моль/дм³ растворов HCl извлекают палладий (II) на ~ 40-96 %, а серебро (I) на ~ 56-82%. Однако соотношение твердой и жидкой фазы в случае сорбции на анионитах марки Purolite составляет 1:100, тогда как в данной работе – 1:2500.

Установление времени достижения равновесия сорбции серебра (I) поли(N-винилимидазолом) из солянокислых растворов в присутствии золота (III) и палладия (II). Скорость достижения равновесия при сорбции является одной из основных характеристик сорбционных материалов, определяющей возможность их

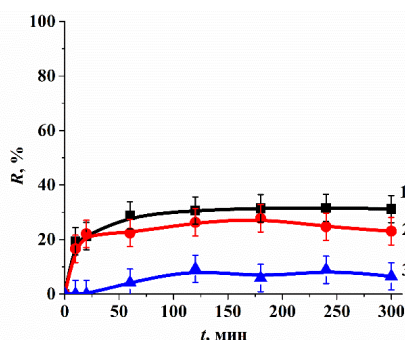


Рис. 3. Интегральные кинетические кривые сорбции (1 – серебра (I); 2 – золота (III); 3 – палладия (II)) из 1 моль/дм³ раствора HCl поли(N-винилимидазолом). Исходная концентрация металлов – $5 \cdot 10^{-5}$ моль/дм³. $m_{\text{сорбента}} = 0.0200$ г, $V_{\text{раствора}} = 50.0$ см³.
Fig. 3. Integral kinetic curves of sorption (1 – silver (I); 2 – gold (III); 3 – palladium (II)) from 1 mol/dm³ HCl solution with poly(N-vinylimidazole). The initial concentration of metals is $5 \cdot 10^{-5}$ mol/dm³. The sorbent is 0.0200 g, and the solution is 50.0 cm³.

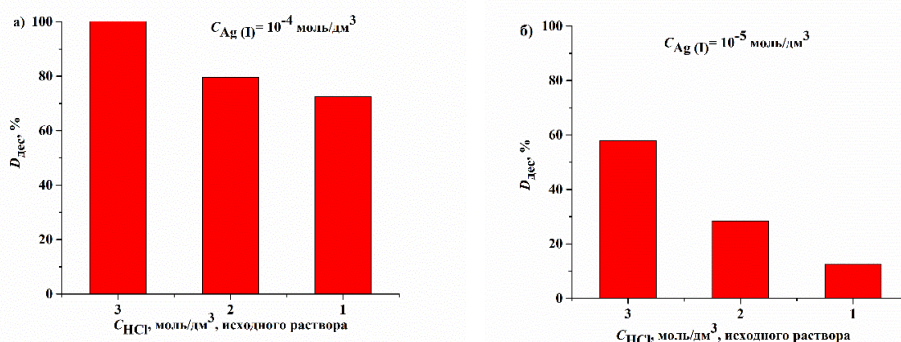


Рис. 4. Степень десорбции серебра (I) с поли(N-винилимидазола) с использованием различных регенерантов: а) $C_{\text{HCl}} = 3.5$ моль/дм³; б) $C_{\text{NH}_3} = 0.1$ моль/дм³. $m_{\text{сорбента}} = 0.0200$ г, $V_{\text{регенеранта}} = 25.0$ см³.
Fig. 4. The degree of desorption of silver (I) from poly(N-vinylimidazole) using various regenerants: а) $C_{\text{HCl}} = 3.5$ mol/dm³; б) $C_{\text{NH}_3} = 0.1$ mol/dm³. $m_{\text{sorbent}} = 0.0200$ g, $V_{\text{regenerate}} = 25.0$ cm³.

применения на практике. Получена зависимость сорбции благородных металлов сшитым поли(N-винилимидазолом) при их совместном присутствии в растворе с концентрацией хлороводородной кислоты 1 моль/дм³ от времени контакта фаз (рисунок 3).

Исходя из полученных данных было установлено, что равновесие в системах «раствор солей благородных металлов – поли(N-винилимидазол)» достигается в течение 120 минут контакта фаз. На основании полученных данных можно предположить, что наибольший вклад в механизм сорбции вносит комплексообразование, по сравнению с ионообменным взаимодействием, протекающим, как

правило, значительно быстрее. Время достижения равновесия сорбции ионов благородных металлов сшитым поли(N-винилимидазолом) сопоставимо с данными для других комплексообразующих материалов [15, 16] и превышает аналогичную величину для ионообменных сорбентов [11-13, 17].

Десорбция металлов с поли(N-винилимидазола) в статических условиях. Важнейшим этапом исследования сорбционных свойств материалов является изучение их способности к регенерации. Наиболее часто для десорбции золота и палладия используют растворы кислот, тиоцианатов и тиомочевины [18-21]. Для десорбции серебра используют растворы

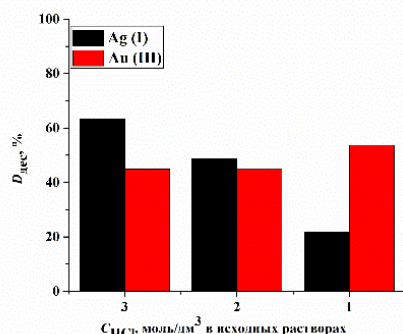


Рис. 5. Степень десорбции серебра (I) и золота (III) при их совместном присутствии с поли(N-винилимидазола), при использовании в качестве регенеранта 1%-го раствора тиомочевины в 2 моль/дм³ растворе HCl.

$m_{\text{сорбента}} = 0.0200$ г, $V_{\text{регенеранта}} = 25.0$ см³.

Fig. 5. The degree of desorption of silver (I) and gold (III) in their combined presence with poly(N-vinylimidazole), when using a 1% solution of thiourea in 2 mol/dm³ HCl solution as a regenerant. $m_{\text{sorbent}} = 0.0200$ g, $V_{\text{Regenerate}} = 25.0$ cm³.

азотной кислоты и различных комплексообразователей, таких как аммиак и роданиды [22-24]. Значения степеней десорбции серебра после сорбции из индивидуальных растворов с использованием различных регенерантов приведены на рисунке 4.

Показано (рисунок 4), что значения степеней десорбции 0.1 моль/дм³ раствором аммиака намного меньше, чем при использовании 3.5 моль/дм³ HCl. Это связано с тем, что хлориды, в отличие от аммиака, могут не только образовывать комплексы с серебром (I), но и конкурировать с отрицательно заряженными комплексами этого иона металла, вытесняя их в раствор.

После сорбции серебра (I) и золота (III) при совместном присутствии в растворе проводили их десорбцию с поверхности сорбента с использованием 1%-го раствора тиомочевины в 2 моль/дм³ HCl. Из рисунка 5 видно, что солянокислый

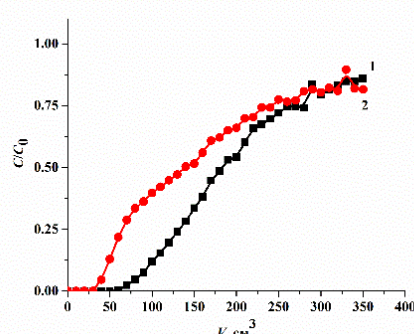


Рис. 6. Динамические выходные кривые сорбции (1 – серебра (I); 2 – золота (III)) поли(N-винилимидазолом) при их совместном присутствии из 1 моль/дм³ солянокислого раствора. Исходная концентрация ионов металлов – $5 \cdot 10^{-5}$ моль/дм³. $m_{\text{сорбента}} = 0.1000$ г. Скорость пропускания раствора 2 см³/мин.

Fig. 6. Dynamic output sorption curves (1 – silver (I); 2 – gold (III)) poly(N-vinylimidazole) in their combined presence from 1 mol/dm³ hydrochloric acid solution. The initial concentration of metal ions is $5 \cdot 10^{-5}$ mol/dm³. m_{sorbent} is 0.1000 g. The flow rate of the solution is 2 cm³/min.

раствор тиомочевины обеспечивает более высокие значения степени десорбции для серебра (I) и золота (III), что можно объяснить тем, что тиомочевина образует достаточно устойчивые комплексы с ионами благородных металлов.

Исследование сорбции серебра (I) поли(N-винилимидазолом) из солянокислых растворов в присутствии золота (III) и палладия (II) в динамических условиях. Динамический режим сорбции обеспечивает эффективное разделение ионов металлов, является достаточно экономичным и экспрессным. Однако, важной задачей является подбор оптимальных условий (скорость пропускания раствора, количество сорбента, pH и т.д.).

В результате исследования динамики сорбции серебра (I) и золота (III) установлено, что сорбент на основе поли(N-винилимидазола) может использоваться для количественного извлечения рассматриваемых ионов, поскольку на соответствующих динамических кривых сорбции

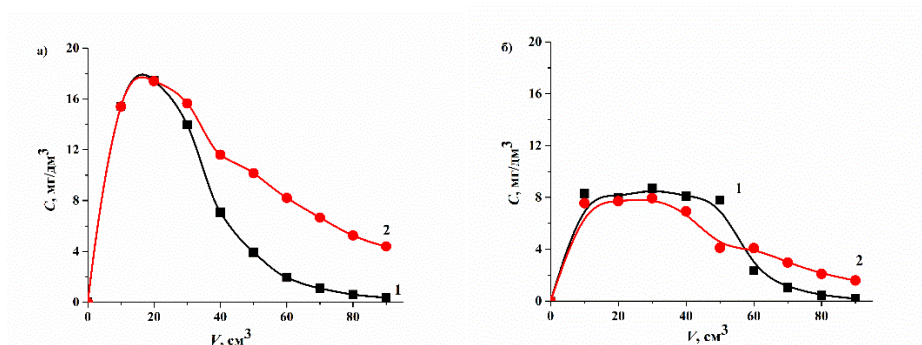


Рис. 7. Кривые элюирования (1 – серебра (I); 2 – золота (III)) с поли(Н-винилимидазола) при их совместном присутствии на сорбенте с использованием в качестве регенеранта HCl с концентрацией: а) 3.5 моль/дм³; б) 2 моль/дм³. Исходная концентрация ионов металлов – $5 \cdot 10^{-5}$ моль/дм³. $m_{\text{сорбента}} = 0.1000$ г. Скорость пропускания раствора 2 см³/мин.
Fig. 7. Elution curves of (1 – silver (I); 2 – gold (III)) with poly(N-vinylimidazole) in their combined presence on a sorbent using HCl as a regenerant with a concentration of: a) 3.5 mol/dm³; b) 2 mol/dm³. Initial The concentration of metal ions is $5 \cdot 10^{-5}$ mol/dm³. The m_{sorbent} is 0.1000 g. The solution transmission rate is 2 cm³/min.

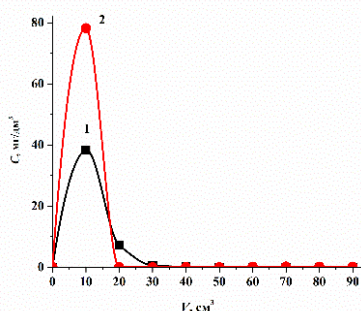


Рис. 8. Кривые элюирования (1 – серебра (I); 2 – золота (III)) с поли(Н-винилимидазола) при их совместном присутствии на сорбенте с использованием в качестве регенеранта 1 %-го раствора тиомочевины в 2 моль/дм³ HCl. Исходная концентрация ионов металлов – $5 \cdot 10^{-5}$ моль/дм³. $m_{\text{сорбента}} = 0.1000$ г. Скорость пропускания раствора 1 см³/мин.

Fig. 8. Elution curves of (1 –sulfur (I); 2 – gold (III)) with poly(N-vinylimidazole) in their combined presence on a sorbent using a 1% solution of thiourea in 2 mol/dm³ HCl as a regenerant. The initial concentration of metal ions is $5 \cdot 10^{-5}$ mol/dm³. The sorbent is 0.1000 g. The flow rate of the solution is 1 cm³/min.

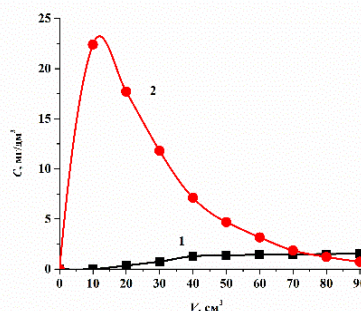


Рис. 9. Кривые элюирования (1 – серебра (I); 2 – золота (III)) с поли(Н-винилимидазола) при их совместном присутствии на сорбенте с использованием 1 моль/дм³ раствора NH₄SCN. $m_{\text{сорбента}} = 0.1000$ г. Скорость пропускания раствора 2 см³/мин. Исходная концентрация ионов металлов – $5 \cdot 10^{-5}$ моль/дм³.

Fig. 9. Elution curves of (1 – silver (I); 2 – gold (III)) with poly(N-vinylimidazole) in their combined presence on a sorbent using 1 mol/dm³ NH₄SCN solution. $m_{\text{sorbent}} = 0.1000$ g. The flow rate of the solution is 2 cm³/min. Initial concentration of metal ions – $5 \cdot 10^{-5}$ mol/dm³

присутствует участок до проскока (рисунок 6). Значение емкости сшитого поли(Н-винилимидазола) до проскока по серебру (I) составило 25.6 мкмоль/г, по золоту (III) – 14.5 мкмоль/г.

На рисунках 7-9 представлены кривые элюирования благородных металлов с использованием различных регенерантов. Показано, что со снижением концентрации соляной кислоты от 3.5 до 2 моль/дм³

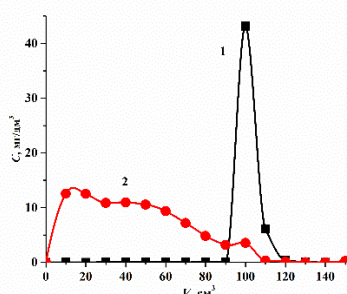


Рис. 10. Кривая элюирования (1 – серебра (I); 2 – золота (III)) с поли(N-винилимидазола) последовательно 90.0 см³ 0.5 моль/дм³ раствора NH₄SCN и 60.0 см³ 1%-го раствора тиомочевины в 2 моль/дм³ HCl со скоростью 2 см³/мин. $m_{\text{сорбента}} = 0.1000$ г. Исходная концентрация ионов металлов – $5 \cdot 10^{-5}$ моль/дм³.

Fig. 10. Elution curve (1 – silver (I); 2 – gold (III)) with poly(N-vinylimidazole) successively 90.0 cm³ of 0.5 mol/dm³ NH₄SCN solution and 60.0 cm³ of 1% thiourea solution in 2 mol/dm³ HCl at a rate of 2 cm³/min. $m_{\text{sorbent}} = 0.1000$ g. The initial concentration of metal ions is $5 \cdot 10^{-5}$ mol/dm³.

Таблица 2. Значения степени десорбции (D , %) серебра (I) и золота (III) с поли(N-винилимидазола) в динамических условиях, с использованием последовательно 90.0 см³ 0.5 моль/дм³ NH₄SCN и 60.0 см³ 1 %-го раствора тиомочевины в 2 моль/дм³ HCl. C_0 (ионов) = $5 \cdot 10^{-5}$ моль/дм³, масса сорбента 0.1000 г, скорость пропускания 2 см³/мин

Table 2. Values of the degree of desorption (D , %) of silver (I) and gold (III) with poly(N-vinylimidazole) under dynamic conditions, using sequentially 90.0 cm³ 0.5 mol/dm³ NH₄SCN and 60.0 cm³ 1% thiourea solution in 2 mol/dm³ HCl. C_0 (ions) = $5 \cdot 10^{-5}$ mol/dm³, sorbent mass 0.1000 g, transmission rate 2 cm³/min

Ион металла	Регенерант	
	0.5 моль/дм ³ NH ₄ SCN	1%-ый раствор тиомочевины в 2 моль/дм ³ HCl
Ag (I)	0.4	99.6
Au (III)	95.5	4.5

(рис. 7) суммарная степень десорбции золота (III) уменьшается от 100 до 67.8 %, а степень десорбции серебра (I) – от 74.9 до 66.4%.

На рисунке 8 приведены кривые элюирования серебра (I) и золота (III) с сшитого поли(N-винилимидазола), полученные путем пропускания 1%-го раствора тиомочевины в 2 моль/дм³ HCl со скоростью 1 см³/мин. Степень десорбции в данном случае составила 100%

Увеличение скорости пропускания солянокислого раствора тиомочевины до 2 см³/мин не повлияло на степень десорбции металлов с исследуемого сорбента. Также исследовали десорбцию ионов благородных металлов 1 моль/дм³ раствором NH₄SCN. Исходя из полученных данных (рис.9) можно сделать вывод о том, что степень десорбции золота (III)

существенно больше степени десорбции серебра (I). На основании полученных результатов можно предположить, что применение 1 моль/дм³ раствора роданида аммония перспективно для селективного элюирования золота (III) с поли(N-винилимидазола) в присутствии серебра (I) на поверхности этого же сорбента.

Поскольку серебро (I) и золото (III) извлекаются совместно (рис. 6), для их разделения проводили последовательную десорбцию со сшитого поли(N-винилимидазола). Для селективного элюирования серебра (I) и золота (III) осуществляли последовательное пропускание через патрон с сорбентом 0.5 моль/дм³ роданида аммония и 1 %-го раствора тиомочевины в 2 моль/дм³ HCl (рис. 10). В таблице 2 приведены значения степени десорбции серебра (I) и золота (III).

Установлено, что последовательное применение регенерантов позволяет селективно элюировать Ag (I) и Au (III) при их совместном присутствии на сорбенте. Для полного элюирования золота (III) требуется $90.0 \text{ см}^3 0.5 \text{ моль/дм}^3 \text{ NH}_4\text{SCN}$, а для серебра (I) достаточно первых 10.0 см^3 пропущенного 1 %-го раствора тиомочевины в $2 \text{ моль/дм}^3 \text{ HCl}$ (рис. 10). Вследствие этого в дальнейшем необходим подбор оптимального состава элюента для количественной десорбции золота с поли(N-винилимидазола), который будет обеспечивать наибольший коэффициент концентрирования.

Заключение

Исследована сорбция серебра (I) поли(N-винилимидазолом), сшитым 1,4-бис(бромметил)бензолом из индивидуальных солянокислых растворов, а также в присутствии золота (III) и палладия (II). В результате проведенных исследований установлено, что поли(N-винилимидазолом) серебро (I) извлекается в наибольшей степени из $1 \text{ моль/дм}^3 \text{ HCl}$. При этом

селективное извлечение серебра (I) в присутствии золота (III) и палладия (II) поли(N-винилимидазолом) в статических условиях не достигается. Максимальная степень извлечения ионов благородных металлов поли(N-винилимидазолом) достигается в течение 120 минут. Установлено, что в динамических условиях исследуемый сорбент совместно извлекает серебро (I) и золото (III) из $1 \text{ моль/дм}^3 \text{ HCl}$. Для их разделения предложен способ последовательного элюирования 0.5 моль/дм^3 раствором роданида аммония и 1 %-ым раствором тиомочевины в $2 \text{ моль/дм}^3 \text{ HCl}$. Показано, что разделение серебра (I) и золота (III) после их сорбции поли(N-винилимидазолом), сшитым 1,4-бис(бромметил)бензолом, можно достичь последовательным элюированием.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

6. Skalny A.V. Chemical elements in human physiology and ecology. M., Mir, 2004, 216 p. (In Russ.)

7. Alifkhanova L.M., Lopunova K.Ya., Marchuk A.A., Petrova Yu.S., Pestov A.V., Neudachina L.K., *J. Inorg. Chem*, 2021; 66(6): 814-821. <https://doi.org/10.31857/S0044457X21060027>.

8. Petrova Yu.S., Alifkhanova L.M., Kuznetsova K.Ya., Neudachina L.K., Pestov A.V., *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2023; 22(5): 737-747. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/10716> (In Russ.)

9. Bratskaya S.Yu., Azarova Yu.A., Matochkina E.G., Kodess M.I., Yatluk Yu.G., Pestov A.V. N-(2-(2-pyridyl)ethyl)chitosan: Synthesis, characterization and sorption properties, *Carbohydr. Polym*, 2012; 87: 869-875. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.08.081>

10. Sipkina E.I., *Proceedings of universities. applied chemistry and biotechnology*. 2015; 4(15): 7-19. (In Russ.)

11. Kononova O.N., Duba E.V., Medovikov D.V., Efimova A.S., Ivanov A.I., Krylov A.S. *J.*

Список литературы/References

1. Coruh S.A., Senel G., Ergun O.N. *J. Hazard. Mater.*, 2010; 180(1-3): 486-492. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.04.056>.

2. Behbahani M., Najafi F., Amini M.M., Sadeghi O., Hassanlou P.G. *J. Ind. and Eng. Chem.*, 2014; 20(4): 2248-2255. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.09.057>.

3. Chakrabortya S. C., Qamruzzamana M., Zaman M.W.U. *Process Saf. Environ. Prot.*, 2022; 162: 230-252. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.04.011>

4. Pawlak J., Lodyga-Chruscinska E., Chrastowicz J., *J. Trace Elem. Med Biol.*, 2014; 28(3): 247-254. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2014.03.005>

5. Petrenko D.B. Elements of the platinum group in the environment and their ecological danger, *Bulletin of Moscow State University. Series "Natural Sciences"*, 2011; 5: 49-53 <https://www.elibrary.ru/oyxhor>

Phys. Chem., 2017; 91(12): 2091-2096.
<https://doi.org/10.1134/S0044453718100138>

12. Kononova O.N., Duba E.V., Medovikov D.V., Krylov A.S. *J. Phys. Chem.*, 2018; 92(10): 1641-1647. <https://doi.org/10.1134/S0044453718100138>

13. Kononova O.N., Duba E.V., Efimova A.S., Ivanov A.I., Krylov A.S. *J. Phys. Chem.*, 2020; 94(4): 602-609. <https://doi.org/10.31857/S004445372004007X>

14. Kuznetsova K.Ya., Yakurnova O.D., Kazantsev D.A., Petrova Yu.S., Pestov A.V., Neudachina L.K. *J. Appl. Chem.*, 2024; 97(11-12): 776-782. <https://doi.org/10.31857/S0044461824110057>

15. Zhou L., Liu J., Liu Z. *J. Hazard. Mat.*, 2009; 172: 439-446. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.030>

16. Alifkhanova L.M., Petrova Yu. S., Kuznetsova K.Ya., Zemlyakova E. O., Pestov A.V., Neudachina L.K. *J. Appl. Chem.*, 2022; 95(3): 399-408. <https://doi.org/10.31857/S0044461822030136>

17. Hubicki Z., Wolowicz A. *Hydrometallurgy*, 2009; 96(1-2): 159-165. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.10.002>

18. Fujiwara K., Ramesh A., Maki T., Hasegawa H., Ueda K. *J. Hazard. Mater.*, 2007; 146(1-2): 39-50. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.11.049>

19. Parodi A., Vincent T., Pilsniak M., Trochimczuk A., Guibal E. *Hydrometallurgy.*, 2008; 92(1-2): 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.02.005>

20. Kapitanova E.I., Sinelshchikova A.R., Petrova Yu.S., Zemlyakova E.O., Pestov A.V., Neudachina L.K. *Russ. Chem. Bull. (Int. Ed.)*, 2021; 70(6): 1161-1166. <https://doi.org/10.1007/s11172-021-3199-y>

21. Petrova Yu.S., Pestov A.V., Kapitanova E.I., Usoltseva M.K., Neudachina L. K. *Sep. Purif. Technol.*, 2019; 213: 78-87. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.12.025>

22. Staron P., Chwastowski J., Banach M. *J. Clean. Prod.*, 2017; 149: 290-301. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.116>

23. Junior W.N., Landers R., Silva M.C., Vieira M.G. *J. Environ. Chem. Eng.*, 2021; 9: 104840. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104840>

24. Liu P., Wang X., Tian L., He B. *J. Water Process Eng.*, 2020; 34: 101184. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101184>

Информация об авторах / Information about the authors

К.Я. Кузнецова – аспирант, ассистент кафедры аналитической химии и химии окружающей среды института естественных наук и математики, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

Ю.С. Петрова – заведующий кафедрой аналитической химии и химии окружающей среды института естественных наук и математики, к.х.н., доцент, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

Д.А. Казанцев – аспирант института органического синтеза им. И.Я. Постовского, УрО РАН, Екатеринбург, Россия

А.В. Пестов – доцент кафедры органической химии и высокомолекулярных соединений института естественных наук и математики, к.х.н., доцент, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия; и.о. заведующего лабораторией органических материалов института органического синтеза им. И.Я. Постовского, УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Л.К. Неудачина – доцент кафедры аналитической химии и химии окружающей среды института естественных наук и математики, к.х.н., доцент, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

K.Ya. Kuznetsova – Post-graduate Student, Assistant at the Department of Analytical Chemistry and Environmental Chemistry, Institute of Natural Sciences and Mathematics, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

Yu.S. Petrova – Head of the Department of Analytical Chemistry and Environmental Chemistry at the Institute of Natural Sciences and Mathematics, PhD, Associate Professor, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

D.A. Kazantsev – a post-graduate student at the I.Ya. Postovsky Institute of Organic Synthesis, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

A.V. Pestov – Associate Professor of the Department of Organic Chemistry and High-Molecular Compounds of the Institute of Natural Sciences and Mathematics, PhD, Associate Professor, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia; Acting Head of the Laboratory of Organic Materials at the I.Ya. Postovsky Institute of Organic Synthesis, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

L.K. Neudachina – Associate Professor, Department of Analytical Chemistry and Environmental Chemistry, Institute of Natural Sciences and Mathematics, PhD, Associate Professor, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

Статья поступила в редакцию 16.05.2025; одобрена после рецензирования 04.08.2025; принята к публикации 06.08.2025.

The article was submitted 16.05.2025; approved after reviewing 04.08.2025; accepted for publication 06.08.2025.