

Научная статья

УДК 543.05

DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-1-30-37>



Сорбция ионов серебра (I) синтетическим сорбентом из водных растворов

Нармин Тофик кызы Эфендиева, Абель Мамедали оглы Магеррамов,
Фамиль Муса оглы Чырагов

Бакинский государственный университет, г. Баку, Азербайджан

Автор, ответственный за переписку: Эфендиева Нармин Тофик кызы, afandiyeva.narmin@mail.ru

Аннотация. Цель настоящего исследования заключается в изучении сорбции ионов серебра синтетическим хелатообразующим сорбентом из водных растворов. В присутствии формальдегида синтезирован полимерный сорбент на основе сополимера стирола с малеиновым ангидридом, модифицированный *N,N'*-дифенилгуанидином, который впервые применен для извлечения $Ag(I)$. Состав и строение синтезированного полимерного хелатообразующего сорбента были изучены методами ИК- и УФ-спектроскопии. Использован простой, недорогой и эффективный метод извлечения ионов $Ag(I)$ из водных растворов. Исследовано влияние на процесс сорбции различных сорбционных параметров: кислотности среды (pH); начальной концентрации иона металла; времени, необходимого для установления полного сорбционного равновесия; ионной силы. Оптимальное значение pH для извлечения $Ag(I)$ составляет 6. Процесс характеризуется высокой адсорбционной способностью, которая достигает значения 547,2 мг/г. В результате проведенных исследований определено, что время, необходимое для установления полного сорбционного равновесия для сорбента, модифицированного *N,N'*-дифенилгуанидином, составляет 60 мин. Адсорбция $Ag(I)$ увеличивается с ростом ионной силы до $\mu = 1$, а затем уменьшается. На конечном этапе был проведен процесс десорбции поглощенных ионов серебра. В процессе десорбции было обнаружено, что лучшим элюирующим агентом для извлечения $Ag(I)$ является 0,5 М HNO_3 . Возможно многократное использование регенерированного сорбента для концентрирования. Соплимер стирола и малеинового ангидрида, модифицированного *N,N'*-дифенилгуанидином, имеет высокое значение сорбционной емкости и благодаря данному преимуществу может быть применен в качестве потенциального адсорбента для извлечения серебра (I) из водных растворов.

Ключевые слова: серебро (I), хелатообразующий синтетический сорбент, сорбция, концентрирование

Для цитирования: Эфендиева Н. Т., Магеррамов А. М., Чырагов Ф. М. Сорбция ионов серебра (I) синтетическим сорбентом из водных растворов // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2022. Т. 12. N 1. С. 30–37. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-1-30-37>.

CHEMICAL SCIENCES

Original article

Sorption of silver (I) ions from aqueous solutions using the synthetic sorbent

Narmin T. Afandiyeva, Abel M. Maharramov,
Famil M. Chyragov

Baku State University, Baku, Azerbaijan

Corresponding author: Narmin T. Afandiyeva, afandiyeva.narmin@mail.ru

Abstract. We study the sorption of silver ions from aqueous solutions by a synthetic chelating sorbent. In the presence of formaldehyde, a polymeric sorbent based on a copolymer of styrene with maleic anhydride, modified with *N,N'*-diphenylguanidine, was synthesized and further used for extracting $Ag(I)$ ions. The composition and structure of the synthesized polymeric chelating sorbent were studied using IR and UV spectroscopy methods. A simple, inexpensive, and efficient method for extracting $Ag(I)$ ions from aqueous solutions was used. The effect of various parameters on the sorption process was studied, including the acidity of the medium (pH), the initial concentration of the metal ion, the time required to establish complete sorption equilibrium, and ionic strength. The optimum pH value for the extraction of $Ag(I)$ was found to be 6. The pro-

cess is characterized by a high adsorption capacity reaching 547.2 mg/g. The research results showed that the time required to establish a complete sorption equilibrium for the sorbent modified with N,N'-diphenylguanidine is 60 min. Ag(I) adsorption increases up to the value of ionic strength of $\mu = 1$, after which its intensity decreases. At the final stage, the process of desorption of absorbed silver ions was carried out. During desorption, the best eluting agent for the extraction of Ag(I) was determined to be 0.5 M HNO₃. The sorbent can be re-used after regeneration. The copolymer of styrene and maleic anhydride modified with N,N'-diphenylguanidine has a high sorption capacity and, therefore, can be used as a potential adsorbent for the extraction of silver (I) from aqueous solutions.

Keywords: silver (I), chelating synthetic sorbent, sorption, concentration

For citation: Afandiyeva N. T., Maharramov A. M., Chyragov F. M. Sorption of silver (I) ions from aqueous solutions using the synthetic sorbent. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2022;12(1):30-37. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-1-30-37>.

ВВЕДЕНИЕ

Серебро является одним из драгоценных металлов и с давних времен используется для изготовления зеркал, ювелирных украшений и монет. Обладая высокой электро- и теплопроводностью, серебро активно применяется в электронике, медицине, фотографии и других сферах. Металлическое серебро не является опасным для человека веществом. Однако при переходе в раствор в виде ионов серебра или химического соединения свойства серебра начинают меняться. Например, нитрат серебра действует раздражающе на кожу и слизистые оболочки, а при продолжительном воздействии может вызвать серьезные химические ожоги. Первым признаком хронического отравления серебром является усиленная пигментация радужной оболочки глаза. Продолжительное воздействие ионов серебра вызывает аргирию (или аргироз) [1], при этом мельчайшие частички серебра откладываются не только в коже, но и в волосах, на слизистых оболочках и во внутренних органах. При аргирии кожа принимает серовато-синий цвет. Происходит необратимая пигментация кожи: на открытых для солнца участках кожа темнеет, приобретая цвет загара, так как серебро стимулирует выработку меланина. Это заболевание может развиваться при длительном применении медицинских препаратов на основе серебра или при употреблении серебряной воды: природная вода, используемая для питья, в норме содержит 5 мг серебра на 1 л воды, а вода, в которую добавляют серебро с целью дезинфекции, – 50 мг, то есть в 10 раз больше. Всемирная организация здравоохранения определяет предел допустимых концентраций серебра как 100 мкг/л (0,1 мг/л)¹.

Серебро является тяжелым металлом, а ионное серебро называют клеточным ядом, поскольку его высокая концентрация вызывает нарушение работы ферментов внутри клетки, которые ответственны за метаболизм и размножение, что приводит к нарушению нормальной работы и последующей ее гибели. Санитарной

токсикологической службой серебро признано высокоопасным химическим веществом, имеющим 2-й класс опасности.

Известны такие методы извлечения серебра, как экстракция, ионный обмен, сорбция [2–11]. Среди указанных методов сорбция благодаря простоте и эффективности процесса используется как эффективный метод извлечения ряда ионов тяжелых металлов.

Х.-Г. Ли с соавторами [12] изучали адсорбцию ионов Ag(I) на микрочастицах поли(о-фенилендиамина), синтезированных путем химической окислительной полимеризации о-фенилендиамина. Максимальная адсорбционная способность по отношению к ионам серебра составила 533 мг·г⁻¹. В. J. Anderson и др. исследовали сорбцию серебра слабокристаллизованными оксидами марганца. Марганцевые манганиты показали наибольшую сорбцию при pH = 7 [13]. Т. Jintakosola с соавторами использовали композитные шарики хитозан/монтмориллонит в качестве адсорбентов для извлечения иона серебра (I) из водного раствора. Серебро (I) быстрее адсорбировалось в первые 30 мин [14]. А. А. Atia и др. применяли глицидилметакрилат/дивинилбензолную смолу для извлечения серебра (I) из водных растворов [15]. Н. Yirikoglu и др. использовали хелатирующие смолы меламина-формальдегид-тиомочевина (МФТ) для отделения и извлечения ионов серебра (I) от ионов щелочных металлов. Максимальная сорбционная емкость смолы МФТ по отношению к ионам серебра была определена как 60,05 мг/г пакетным методом и 11,08 мг/г коллочным методом [16].

Широко применяется адсорбция с использованием синтетических хелатообразующих сорбентов, которые проявляют высокую сорбционную емкость по отношению к ионам тяжелых металлов и являются эффективными для их извлечения из водных растворов [17–19]. Известно, что для определения тяжелых металлов важны хелатообразующие лиганды, содержащие донорные атомы кислорода, азота, серы, йода и

¹Silver in Drinking-water, World Health Organization, 2003. Originally published in Guidelines for drinking-water quality, 2nd ed. Vol. 2. Health criteria and other supporting information. Geneva: World Health Organization, 1996.

других элементов.

Цель настоящего исследования заключалась в сорбционном концентрировании ионов серебра (I) из водных растворов синтетическим сорбентом, полученным на основе сополимера стирола с малеиновым ангидридом (ССМА), модифицированным N,N'-дифенилгуанидином из водных растворов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Реагенты. Все химические вещества и реагенты, использованные в анализе, имеют классификацию ч.д.а. Стандартный раствор серебра (I) получали растворением соответствующего количества AgNO_3 в дистиллированной воде и добавлением 2–3-х капель концентрированной HNO_3 . Рабочие растворы готовили из стандартного раствора разбавлением дистиллированной водой. Раствор реагента концентрацией $1,0 \cdot 10^{-3}$ моль/л готовили с использованием бидистиллированной воды. Оптическую плотность растворов измеряли на фотоколориметре КФК-2 (АО «Загорский оптико-механический завод», Россия) в кюветках с толщиной поглощающего слоя, равной 1 см.² Исследования адсорбции проводились с использованием $1,0 \times 10^{-2}$ моль/л водного раствора AgNO_3 .

Влияние pH на адсорбцию ионов серебра (I) изучали в диапазоне значений от 3 до 8, pH буферных растворов поддерживали постоянным с использованием растворов уксусной кислоты и гидроксида аммония. Влияние ионной силы на адсорбцию исследовали с применением 2 моль/л раствора KCl. В процессе десорбции использовали 0,5 моль/л раствора KOH.

Для синтеза сорбента применяли сополимер стирола с малеиновым ангидридом (рис. 1, а) и N,N'-дифенилгуанидином (рис. 1, б) в качестве амина.

Оборудование. pH растворов измеряли с помощью иономера PHS-25 со стеклянным электродом (Чжэцзян, Китай). Равновесные концентрации ионов металла были определены на фотоколориметре КФК-2 (АО «Загорский оптико-механический завод», Россия) в кюветках с толщиной поглощающего слоя $l=1$ см. Для перемешивания растворов использовали термомиксер Orbital Shaker TS-1 (Analytik Jena GmbH, Китай). Сорбент высушивали в сушильном шкафу Zymark TurboVar LV (Marshall Scientific, США). Инфракрасные измерения сорбента были получены с применением спектрометра Varian 3600 Fourier Transform (Varian Inc., Япония) в диапазоне от 400 до 4000 см^{-1} . УФ-спектр сорбента был получен с использованием спектрофотометра Specord 210 Plus (Analytic Jena AG, Германия) в диапазоне длин волн 190–1100 нм.

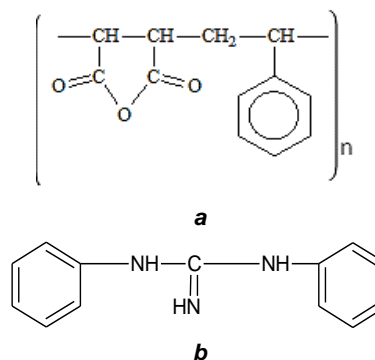


Рис. 1. Молекулярное строение сополимера стирола с малеиновым ангидридом (а) и N,N'-дифенилгуанидином (б)

Fig. 1. Molecular structure of the maleic anhydride styrene copolymer (a) and N,N'-diphenylguanidine (b)

Синтез хелатного адсорбента проводили по методике, представленной в работе³. Для синтеза сорбента в колбу добавляли 3 г сополимера малеинового ангидрида со стиролом и соответствующее количество амина. N,N'-дифенилгуанидин растворяли в воде. Реакция протекала в песчаной бане с непрерывным перемешиванием в присутствии формалина при температуре 333,15–343,15 К и длилась примерно 32–40 мин. Так как процесс синтеза происходит в водной среде, ангидридные группы сополимера подвергаются гидролизу. Из-за взаимного влияния формальдегида и амина образуется нестабильный карбониламин. Полученный карбониламин взаимодействует с карбоксильными группами макромолекулы, и аминный фрагмент входит в макромолекулу.

По окончании реакции полученный продукт отфильтровывали, промывали, высушивали, измельчали и использовали в дальнейших исследованиях. Состав и структура полученного сорбента были изучены методом ИК- и УФ-спектроскопии. Схематическое изображение процесса поликонденсации представлено на рис. 2.

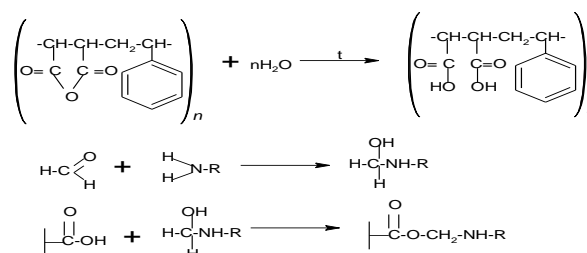


Рис. 2. Схематическое изображение процесса поликонденсации

Fig. 2. Schematic representation of the polycondensation process

²Булатов М. И., Калинин И. П. Практическое руководство по фотометрическим и спектрофотометрическим методам анализа. 5-е изд., перераб. Л.: Химия, 1986. 432 с.

³Акперов О. Г. Практикум по химии высокомолекулярных соединений: учеб. пособие. Баку, 2002. 224 с.

Концентрирование. Все эксперименты по адсорбции проводились в статических условиях при комнатной температуре. Аммиачно-ацетатные буферные растворы готовили, используя 0,1 моль/л NH₄OH и 0,1 моль/л CH₃COOH.

Сорбционную емкость сорбента, Q (мг/г), по отношению к ионам Ag(I) рассчитывали по уравнению:

$$Q = \frac{(C_0 - C_e)V}{m}, \quad (1)$$

где C₀ – начальная концентрация ионов серебра, моль/л; C_e – концентрация ионов серебра после сорбции, моль/л; V – объем раствора; m – масса сорбента, мг. Максимальная сорбционная емкость сорбента к ионам серебра составила 547,2 мг/г.

Процент извлечения ионов серебра, R, рассчитывали как отношение разницы концентраций ионов серебра в растворе до и после сорбции к концентрации ионов серебра в растворе до сорбции с использованием следующего уравнения:

$$\%R = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100, \quad (2)$$

где C₀ и C_e – начальная и равновесная концентрации ионов серебра соответственно. Максимальная степень извлечения ионов серебра из раствора при использовании сорбента, модифицированного N,N'-дифенилгуанидином, составила 97,2%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Методом ИК-спектроскопии изучено строение полученного сорбента⁴. Результаты исследования ИК-спектра ССМА–N,N'-дифенилгуанидин представлены на рис. 3. В ИК-спектре сорбента наблюдаются следующие колебания: валентные колебания –ОН-группы при 3448 см⁻¹, –С=О-группы – при 1733 см⁻¹, деформационные колебания –NH-группы – при 1641 см⁻¹, валентные колебания –С-С-связей ароматического кольца – при 1539 см⁻¹, деформационные колебания –С-С-связей в ароматическом кольце – при 1075–1027 см⁻¹ (в плоскости ароматического кольца) и при 914–693 см⁻¹ (вне плоскости ароматического кольца).

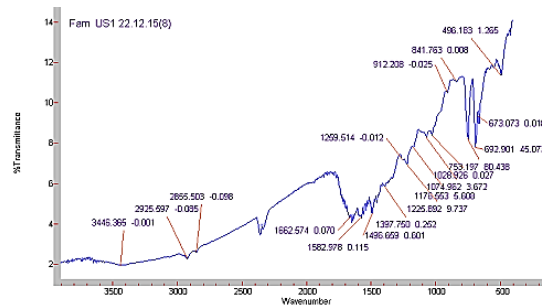


Fig. 1. IR-spectroscopy of S: before adsorption

Рис. 3. ИК-спектр сорбента

Fig. 3. FT-IR spectra of the sorbent

УФ-спектроскопия сорбента была исследована в диапазоне длин волн 190–1100 нм [20]. УФ-спектр сополимера стирола с малеиновым ангидридом, модифицированный N,N'-дифенилгуанидином, представлен на рис. 4. Полосы при длине волны ~1000 нм образуются n→π* электронным переходом в молекуле сорбента.

Влияние кислотности среды. Концентрация ионов водорода в жидкой фазе является одним из важных факторов, влияющих на равновесие реакции комплексообразования ионов металлов с сорбентами. Сорбцию ионов Ag(I) проводили в статических условиях водных сред, изменяющимся параметром являлась только кислотность среды (pH = 3–8). В конические колбы одинаковой емкости и формы добавляли равное количество (50,000 мг) сорбента. Общий объем жидкой фазы и концентрация ионов металлов в каждой колбе оставались постоянными. По результатам экспериментов степень сорбции проходит через максимум при значении pH, равном 6. Это можно объяснить тем, что при более низких pH адсорбция ионов Ag(I) мала. Когда pH увеличивается и достигает значения 6, центры сорбции становятся доступными. Следовательно, адсорбция ионов серебра (I) увеличивается. Это указывает на то, что механизм сорбции ионов серебра (I) сильно зависит от pH. Значение pH, равное 6, использовалось в качестве оптимального pH для дальнейших исследований. На рис. 5 графически представлена зависимость сорбционной емкости сорбента от pH.

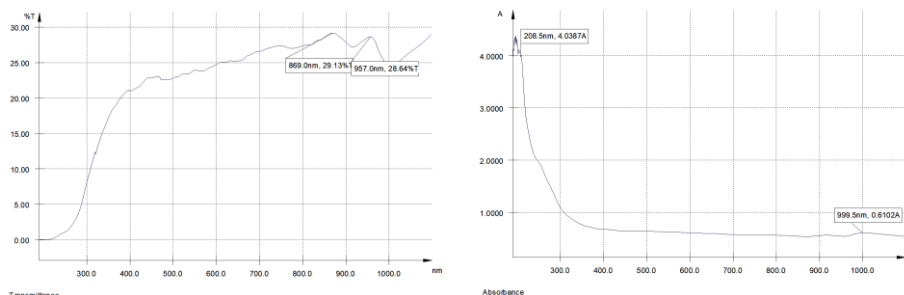


Рис. 4. УФ-спектр сорбента
 Fig. 4. UV spectra of the sorbent

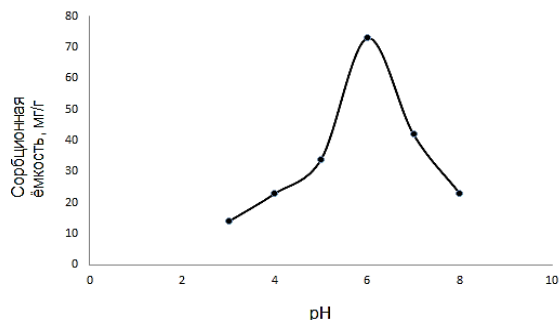


Рис. 5. Зависимость сорбционной емкости сорбента от pH; $m_{\text{сорб.}} = 30$ мг, $V_{\text{общ.}} = 20$ мл, $C_{\text{Me}} = 10^{-2}$ моль/л

Fig. 5. Sorption capacity of sorbent versus pH; $m_{\text{sorb.}} = 30$ mg, $V_{\text{total}} = 20$ ml, $C_{\text{Me}} = 10^{-2}$ mol/l

Время контакта является одним из критических параметров, влияющих на сорбцию и емкость ионов металлов. Для изучения влияния времени контакта в конические колбы объемом 50 мл было добавлено по 50 мг сорбента. Общий объем жидкой фазы составил 20 мл. Результаты экспериментов показали, что сорбция Ag(I) со временем увеличивается. Полная сорбция Ag(I) происходит через час в статических условиях. На рис. 6 графически представлена зависимость сорбционной емкости сорбента от времени контакта.

Влияние начальной концентрации Ag^+ . Для определения количества металла, адсорбированного твердой фазой, предварительно готовили растворы, в которых концентрация ионов Ag(I) варьировалась от $0,4 \cdot 10^{-3}$ до $8,0 \cdot 10^{-3}$ моль/л. Результаты экспериментов показали, что при увеличении начальной концентрации металла количество адсорбированных ионов Ag(I) увеличивается и достигает максимума при $8,0 \cdot 10^{-3}$ моль/л. Дальнейшее увеличение исходной концентрации металла не приводит к значительному изменению количества адсорбированных ионов Ag(I). Сорбционная емкость сорбента по отношению к ионам Ag(I) была вычислена по формуле (1). Рассчитанная максимальная адсорбционная емкость сорбента по отношению к поглощенным ионам Ag(I) составила 547,2 мг/г. Зависимость сорбционной емкости сорбента от начальной концентрации ионов серебра (I) графически изображена на рис. 7.

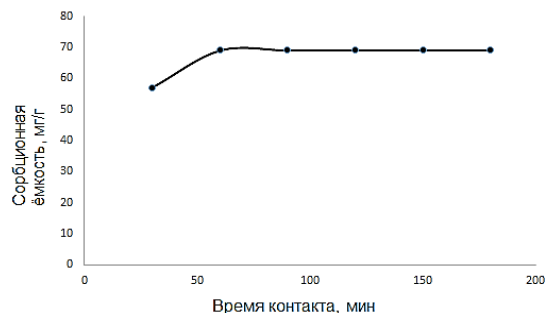


Рис. 6. Влияние времени контакта на сорбционную емкость сорбента; $m_{\text{сорб.}} = 30$ мг, $V_{\text{общ.}} = 20$ мл, $C_{\text{Me}} = 10^{-2}$ моль/л

Fig. 6. Relationship between contact time and sorption capacity of the sorbent; $m_{\text{sorb.}} = 30$ mg, $V_{\text{total}} = 20$ ml, $C_{\text{Me}} = 10^{-2}$ mol/l

Степень извлечения ионов Ag(I) была вычислена по формуле (2), результаты представлены в таблице.

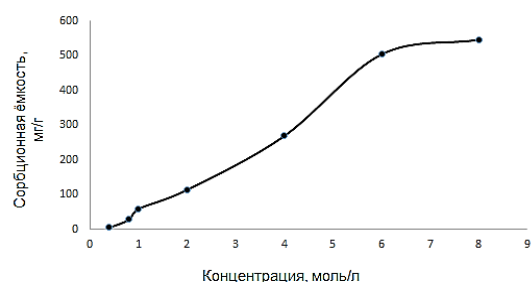


Рис. 7. Влияние начальной концентрации ионов Ag(I) на сорбционную емкость сорбента; $m_{\text{сорб.}} = 30$ мг, $V_{\text{общ.}} = 20$ мл

Fig. 7. Relationship between initial metal ion concentration and the sorption capacity of sorbent; $m_{\text{sorb.}} = 30$ mg, $V_{\text{total}} = 20$ ml

Влияние ионной силы. Изучена зависимость сорбционной емкости от ионной силы раствора. Серебро сорбировали из растворов, содержащих 0,1–1,4 М KCl. Присутствие KCl увеличивало адсорбционную способность до значения $\mu = 1,0$. Далее наблюдалось значительное снижение сорбции металла из растворов KCl с концентрацией более 1,0 М. Все дальнейшие эксперименты проводились в растворах с ионной силой 1,0 М.

Степень извлечения ионов Ag(I) синтезированным сорбентом

Ag(I) ions extraction ratio by a synthesized sorbent

Параметр	Значение						
Значение $C_{\text{Me}} \cdot 10^{-2}$, моль/л	0,4	0,8	1,0	2,0	4,0	6,0	8,0
R, %	19,9	50	83,3	80	93,75	95	97,2

⁴Казицина Л. А., Куплетская Н. Б. Применение УФ-, ИК-, ЯМР-спектроскопии в органической химии: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 1971. 264 с.

Десорбционные исследования. Регенерация и возможность повторного использования хелатообразующих сорбентов зависят от природы функциональных групп и стабильности комплекса, образующегося в фазе сорбента. Образцы сорбентов помещали в конические колбы одинаковой емкости и формы. Для извлечения ионов металла, поглощенных сорбентом, использовали минеральную и органическую кислоты HNO_3 , CH_3COOH различной концентрации (0,5; 1,0; 1,5; 2,0 М). Результаты экспериментов показали, что наилучшими элюирующими свойствами по отношению к ионам серебра (I) из твердой фазы обладает 0,5 М раствор HNO_3 : сорбционная емкость после десорбции изменилась до значения

42,75 мг/г. Для сравнения, десорбция ионов серебра раствором CH_3COOH в той же концентрации (0,5 М) составила 8,44 мг/г.

ВЫВОДЫ

Таким образом, исследование сорбционного концентрирования ионов серебра (I) синтетическим сорбентом из водных растворов показало, что для извлечения Ag(I) сополимером ССМА, модифицированным N,N' -дифенилгуанидином, оптимальное значение pH равно 6, время контакта составляет 60 мин. Максимальная сорбционная емкость сорбента по отношению к ионам серебра (I) достигает значения 547,2 мг/г.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Hadrup N., Lam H. Oral toxicity of silver ions, silver nanoparticles and colloidal silver // *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 2014. Vol. 68, no. 1. P. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2013.11.002>.
2. Kojiro S., Masahiro G. Solvent extraction and stripping of silver ions in room-temperature ionic liquids containing calixarenes // *Analytical Chemistry*. 2004. Vol. 76, no. 17. P. 5039–5044. <https://doi.org/10.1021/ac049549x>.
3. Mammadov P. R., Afandiyeva N. T., Chyragov F. M. Simple and rapid spectrophotometric determination method for trace level of silver using 2,2-di(2,3,4-trihydroksifenilazo)bifenil // *New Materials, Compounds and Applications*. 2018. Vol. 2, no. 2. P. 123–131.
4. Эфендиева Н. Т., Магеррамов А. М., Чырагов Ф. М. Концентрирование ионов серебра синтетическим сорбентом из водных растворов // *Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки*. 2019. Т. 13. N 1. С. 45–49. <https://doi.org/10.31161/1995-0675-2019-13-1-45-49>.
5. Akgül M., Karabakan A., Acar O., Yürüm Y. Removal of silver (I) from aqueous solutions with clinoptilolite // *Microporous and Mesoporous Materials*. 2006. Vol. 94, no. 1-3. P. 99–104. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2006.02.023>.
6. Afandiyeva N. T. Preconcentration of silver (I) on the modified sorbent from aqueous solutions // *New Materials, Compounds and Applications*. 2020. Vol. 4, no. 1. P. 54–60.
7. Virolainen S., Tyster M., Haapalainen M., Sainio T. Ion exchange recovery of silver from concentrated base metal-chloride solutions // *Hydrometallurgy*. 2015. Vol. 152. P. 100–106. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.12.011>.
8. Xie F., Lu D., Yang H., Dreisinger D. B. Solvent extraction of silver and gold from alkaline cyanide solution with LIX 7950 // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2014. Vol. 35, no. 4. P. 229–238. <https://doi.org/10.1080/08827508.2013.825615>.
9. Abd El-Ghaffar M. A., Mohamed M. H., Alwakeel K. Z. Adsorption of silver (I) on synthetic chelating polymer derived from 3-amino-1,2,4-triazole-5-thiol and glutaraldehyde // *Chemical Engineering Journal*. 2009. Vol. 151, no. 1-3. P. 30–38. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.01.039>.
10. Syafiuddin A., Fulazzaky M. A., Salmiati S., Kueh A. B. H., Fulazzaky M., Salim M. R. Silver nanoparticles adsorption by the synthetic and natural adsorbent materials: an exclusive review // *Nanotechnology for Environmental Engineering*. 2020. Vol. 5, no. 1. Article number 1. <https://doi.org/10.1007/s41204-019-0065-3>.
11. Kholmogorova A. S., Chernysh M. L., Neudachina L. K., Puzyrev I. S. Method of adsorption-atomic-absorption determination of silver (I) using a modified polysiloxane // *Reactive and Functional Polymers*. 2020. Vol. 152. Article number 104596. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2020.104596>.
12. Li X.-G., Ma X.-L., Sun J., Huang M.-R. Powerful reactive sorption of silver(I) and mercury(II) onto poly(o-phenylenediamine) microparticles // *Langmuir*. 2009. Vol. 25, no. 3. P. 1675–1684. <https://doi.org/10.1021/la802410p>.
13. Anderson B. J., Jenne E. A., Chao T. T. Sorption of silver by poorly crystallized manganese oxides // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1973. Vol. 37, no. 3. P. 611–622. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(73\)90222-6](https://doi.org/10.1016/0016-7037(73)90222-6).
14. Jintakosola T., Nitayaphat W. Adsorption of silver (I) from aqueous solution using chitosan/montmorillonite composite beads // *Materials Research*. 2016. Vol. 19, no. 5. P. 1114–1121. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2015-0738>.
15. Atia A. A., Donia A. M., Yousif A. M. Comparative study of the recovery of silver(I) from aqueous solutions with different chelating resins derived from glycidyl methacrylate // *Journal of Applied Polymer Science*. 2005. Vol. 97, no. 3. P. 806–812. <https://doi.org/10.1002/app.21751>.
16. Yirikoglu H., Gülfen M. Separation and recovery of silver(I) ions from base metal ions by melamine-formaldehyde-thiourea (MFT) chelating resin // *Separation Science and Technology*. 2008. Vol. 43, no. 2. P. 376–388. <https://doi.org/10.1080/01496390701787305>.

17. Iglesias M., Anticó E., Salvado V. The characterisation of silver sorption by chelating resins containing thiol and amine groups // *Solvent Extraction and Ion Exchange*. 2001. Vol. 19, no. 2. P. 315–327. <https://doi.org/10.1081/SEI-100102698>.

18. Afandiyeva N. T., Maharramov A. M., Chyragov F. M. Silver(I) preconcentration using *m*-aminophenol containing sorbent from aqueous solutions // *Azerbaijan Chemical Journal*. 2021. Issue 1. P. 37–42. <https://doi.org/10.32737/0005-2531-2021-1-37-42>.

19. Huang X., Cao X., Wang W., Cao Z.-F. Investigation of removal of Ag(I) from aqueous solution by a novel chelating resin containing acyl and thiourea groups // *Journal of Dispersion Science and Technology*. 2019. Vol. 40, no. 4. P. 477–486. <https://doi.org/10.1080/01932691.2018.1470011>.

20. Stuart B. H. *Infrared spectroscopy: Fundamentals and application*. Chichester, UK: John Wiley and Sons, 2004. 244 p.

REFERENCES

1. Hadrup N., Lam H. Oral toxicity of silver ions, silver nanoparticles and colloidal silver. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 2014;68(1):1-7. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2013.11.002>.

2. Kojiro S., Masahiro G. Solvent extraction and stripping of silver ions in room-temperature ionic liquids containing calixarenes. *Analytical Chemistry*. 2004;76(17):5039-5044. <https://doi.org/10.1021/ac049549x>.

3. Mammadov P. R., Afandiyeva N. T., Chyragov F. M. Simple and rapid spectrophotometric determination method for trace level of silver using 2,2-di(2,3,4-trihydroksifenilazo)bifenil. *New Materials, Compounds and Applications*. 2018;2(2):123-131.

4. Efendiyeva N. T., Magerramov A. M., Chyragov F. M. Silver ion concentration by synthetic sorbent from the aqueous solutions. *Izvestiya Dagestanskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Estestvennye i tochnye nauki = Dagestan State Pedagogical University Journal. Natural and Exact Sciences*. 2019;13(1):45-49. (In Russian). <https://doi.org/10.31161/1995-0675-2019-13-1-45-49>.

5. Akgül M., Karabakan A., Acar O., Yürüm Y. Removal of silver (I) from aqueous solutions with clinoptilolite. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2006;94(1-3):99-104. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2006.02.023>.

6. Afandiyeva N. T. Preconcentration of silver (I) on the modified sorbent from aqueous solutions. *New Materials, Compounds and Applications*. 2020;4(1):54-60.

7. Virolainen S., Tyster M., Haapalainen M., Sainio T. Ion exchange recovery of silver from concentrated base metal-chloride solutions. *Hydrometallurgy*. 2015;152:100-106. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.12.011>.

8. Xie F., Lu D., Yang H., Dreisinger D. B. Solvent extraction of silver and gold from alkaline cyanide solution with LIX 7950. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2014;35(4):229-238. <https://doi.org/10.1080/08827508.2013.825615>.

9. Abd El-Ghaffar M. A., Mohamed M. H., Alwakeel K. Z. Adsorption of silver(I) on synthetic chelating polymer derived from 3-amino-1,2,4-triazole-5-thiol and glutaraldehyde. *Chemical Engineering Journal*. 2009;151(1-3):30-38. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.01.039>.

10. Syafiuddin A., Fulazzaky M. A., Salmiati S.,

Kueh A. B. H., Fulazzaky M., Salim M. R. Silver nanoparticles adsorption by the synthetic and natural adsorbent materials: an exclusive review. *Nanotechnology for Environmental Engineering*. 2020;5(1). Article number 1. <https://doi.org/10.1007/s41204-019-0065-3>.

11. Kholmogorova A. S., Chernysh M. L., Neudachina L. K., Puzyrev I. S. Method of adsorption-atomic-absorption determination of silver (I) using a modified polysiloxane. *Reactive and Functional Polymers*. 2020;152. Article number 104596. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2020.104596>.

12. Li X.-G., Ma X.-L., Sun J., Huang M.-R. Powerful reactive sorption of silver(I) and mercury(II) onto poly(*o*-phenylenediamine) microparticles. *Langmuir*. 2009;25(3):1675-1684. <https://doi.org/10.1021/la802410p>.

13. Anderson B. J., Jenne E. A., Chao T. T. Sorption of silver by poorly crystallized manganese oxides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1973;37(3):611-622. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(73\)90222-6](https://doi.org/10.1016/0016-7037(73)90222-6).

14. Jintakosola T., Nitayaphat W. Adsorption of silver (I) from aqueous solution using chitosan/montmorillonite composite beads. *Materials Research*. 2016;19(5):1114-1121. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2015-0738>.

15. Atia A. A., Donia A. M., Yousif A. M. Comparative study of the recovery of silver(I) from aqueous solutions with different chelating resins derived from glycidyl methacrylate. *Journal of Applied Polymer Science*. 2005;97(3):806-812. <https://doi.org/10.1002/app.21751>.

16. Yirikoglu H., Gülfen M. Separation and recovery of silver(I) ions from base metal ions by melamine-formaldehyde-thiourea (MFT) chelating resin. *Separation Science and Technology*. 2008;43(2):376-388. <https://doi.org/10.1080/01496390701787305>.

17. Iglesias M., Anticó E., Salvado V. The characterisation of silver sorption by chelating resins containing thiol and amine groups. *Solvent Extraction and Ion Exchange*. 2001;19(2):315-327. <https://doi.org/10.1081/SEI-100102698>.

18. Afandiyeva N. T., Maharramov A. M., Chyragov F. M. Silver(I) preconcentration using *m*-aminophenol containing sorbent from aqueous solutions. *Azerbaijan Chemical Journal*. 2021;(1):37-42. <https://doi.org/10.32737/0005-2531-2021-1-37-42>.

19. Huang X., Cao X., Wang W., Cao Z.-F. Investigation of removal of Ag(I) from aqueous solution by a novel chelating resin containing acyl and thiourea groups. *Journal of Dispersion Science and Technology*. 2019;40(4):477-486. <https://doi.org/10.1080/01932691.2018.1470011>.

org/10.1080/01932691.2018.1470011.

20. Stuart B. H. *Infrared spectroscopy: Fundamentals and application*. Chichester, UK: John Wiley and Sons; 2004. 244 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Н. Т. Эфендиева,

аспирант,
старший лаборант кафедры аналитической химии,
Бакинский государственный университет,
AZ1148, г. Баку, ул. З. Халилова, 23,
Азербайджан,
afandiyeva.narmin@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6251-8989>

А. М. Магеррамов,

д.х.н., академик Национальной академии наук Азербайджана,
профессор, заведующий кафедрой органической химии,
Бакинский государственный университет,
AZ1148, г. Баку, ул. З. Халилова, 23,
Азербайджан,
amaharramov@bsu.edu.az
<https://orcid.org/0000-0003-1882-7519>

Ф. М. Чырагов,

д.х.н., профессор, заведующий кафедрой аналитической химии,
Бакинский государственный университет,
AZ1148, г. Баку, ул. З. Халилова, 23, Азербайджан,
ciraqov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2677-9046>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Поступила в редакцию 05.09.2021.
Одобрена после рецензирования 15.02.2022.
Принята к публикации 28.02.2022.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Narmin T. Afandiyeva,

Postgraduate Student,
Senior Laboratory Assistant,
Baku State University,
23 Z. Khalilov St., Baku, AZ1148, Azerbaijan,
afandiyeva.narmin@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6251-8989>

Abel M. Maharramov,

Dr. Sci. (Chemistry), Academician of Azerbaijan National Academy of Sciences,
Professor, Head of Organic Chemistry Department,
Baku State University,
23 Z. Khalilov St., Baku, AZ1148, Azerbaijan,
amaharramov@bsu.edu.az
<https://orcid.org/0000-0003-1882-7519>

Famil M. Chyragov,

Dr. Sci. (Chemistry), Professor,
Head of Analytical Chemistry Department,
Baku State University,
23 Z. Khalilov St., Baku, AZ1148, Azerbaijan,
ciraqov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2677-9046>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 05.09.2021.
Approved after reviewing 15.02.2022.
Accepted for publication 28.02.2022.