

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



Алифханова Латифа Махир кызы

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СОРБЦИИ ИОНОВ
БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ НА СУЛЬФОЭТИЛИРОВАННЫХ
ПОЛИАМИНОСТИРОЛАХ И ПОЛИАЛЛИЛАМИНАХ**

1.4.4. Физическая химия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата химических наук

Екатеринбург – 2022

Работа выполнена на кафедре аналитической химии и химии окружающей среды Института естественных наук и математики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: **Неудачина Людмила Константиновна**
кандидат химических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Шуняев Константин Юрьевич**,
доктор химических наук, профессор, ФГБУН
Институт металлургии Уральского отделения
Российской академии наук (г. Екатеринбург),
главный научный сотрудник лаборатории
аналитической химии;
Стожко Наталия Юрьевна,
доктор химических наук, профессор, ФГБОУ ВО
«Уральский государственный экономический
университет» (г. Екатеринбург), заведующая
кафедрой физики и химии;
Елохов Александр Михайлович,
кандидат химических наук, ФГАОУ ВО Пермский
государственный национальный исследовательский
университет (г. Пермь), доцент кафедры
неорганической химии, химической технологии и
техносферной безопасности

Защита состоится 21 июня 2022 года в 12:00 на заседании диссертационного совета УрФУ 1.4.01.01 по адресу: 620000, г. Екатеринбург, пр. Ленина, 51, зал диссертационных советов, комн. 248.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
<https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?id=12&rid=3529>

Автореферат разослан «__» мая 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат химических наук, доцент

Кочетова Надежда Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Установление физико-химических закономерностей сорбции ионов металлов является обязательным этапом исследования свойств новых комплексообразующих сорбентов. Получаемые при этом зависимости позволяют не только обосновать основные пути практического использования конкретного сорбента, но и сформировать фундаментальную основу для направленного синтеза материалов с заданными свойствами. В этом отношении особое значение приобретает изучение влияния свойств самого сорбционного материала на селективность концентрирования, а именно природы полимерной матрицы и количества функциональных групп в ее составе.

Аминопolíмеры представляют собой перспективный класс сорбционных материалов для концентрирования широкого круга ионов металлов, в том числе благородных. При этом извлечение последних может протекать как за счет электростатического взаимодействия протонированных аминогрупп и анионных комплексов ионов металлов, так и за счет комплексообразования, что является дополнительным инструментом варьирования селективности процесса. В качестве других преимуществ аминопolíмеров можно выделить высокое содержание функциональных групп в их составе, а также легкость модифицирования дополнительными комплексообразующими группами. К таким материалам относятся сорбенты на основе полистирола и полиаллиламина. Полистирол линейного строения используется для синтеза многих селективных сорбентов, в том числе выпускаемых промышленностью. Введение в состав полистирола аминогрупп позволяет значительно увеличить реакционную способность полимера, а также использовать для его модифицирования больший набор органических реакций. Получаемый таким образом аминопolíмер – полиаминостирол – обладает сорбционными свойствами по отношению к ионам металлов из-за наличия в своем составе комплексообразующих групп. Полиаллиламин также является эффективной матрицей для синтеза комплексообразующих сорбентов. Применение материалов на основе полиаллиламина ограничивается низкой коммерческой доступностью данного полимера, однако относительно низкая молекулярная масса его звена создает предпосылки для формирования высокеемких материалов на его основе.

Ранее [1, 2] в результате исследований, проведенных на кафедре аналитической химии и химии окружающей среды Института естественных наук и математики УрФУ, показано, что сульфэтилирование аминопolíмеров – хитозана и полиэтиленimina – позволяет существенным образом изменить селективные свойства исходных матриц. В Институте органического синтеза УрО РАН под руководством к.х.н. А. В. Пестова впервые синтезированы сульфэтилированные полиаминостиролы (СЭПАС) со степенями замещения атома водорода аминогруппы 0.5, 0.7 и 1.0 и

сульфоэтилированные полиаллиламины (СЭПАА) со степенями замещения атома водорода аминогруппы 0.5 и 1.0, свойства которых ранее не исследовались. Данная работа посвящена комплексному исследованию физико-химических свойств данных сорбентов в зависимости от степени их сульфоэтилирования.

Работа выполнялась при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-33-90081 (Аспиранты) и при финансовой поддержке постановления № 211 Правительства Российской Федерации, контракт № 02.А03.21.0006.

Степень разработанности темы исследования. Ранее исследованы свойства сорбентов на основе хитозана и полиэтиленimina с различными степенями сульфоэтилирования. Показано, что, несмотря на тот факт, что исследуемые сорбенты характеризуются общими закономерностями возрастания селективности сорбции отдельных ионов металлов с ростом степени модифицирования, существенное влияние на их извлечение оказывает и природа аминополимерной матрицы. Настоящая работа продолжает исследование физико-химических свойств сульфоэтилированных аминополимеров и направлена на изучение селективности сорбции ионов благородных металлов материалами на основе полиаминостирола и полиаллиламина.

Цели и задачи. Цель исследования – выявление физико-химических закономерностей сорбции ионов благородных металлов на сульфоэтилированных полиаминостиролах и полиаллиламинах из различных систем.

В рамках поставленной цели решались следующие задачи:

1. Определение статической и динамической обменной емкости (COE_{OH^-} и DOE_{OH^-}) сульфоэтилированных полиаминостиролов и полиаллиламинов по гидроксид-ионам, коэффициентов их влагоемкости.
2. Изучение кислотно-основных свойств и определение констант ионизации функциональных аминогрупп в составе исследуемых сорбентов.
3. Установление закономерностей влияния степени сульфоэтилирования аминополимеров на их сорбционные свойства по отношению к ионам серебра (I), золота (III), палладия (II) и платины (IV) в статическом режиме.
4. Определение кинетических параметров сорбции ионов золота (III), палладия (II), платины (IV) и серебра (I) сульфоэтилированными аминополимерами из растворов сложного состава, выявление вклада диффузионной и химической составляющей в общий механизм сорбции.
5. Получение изотерм сорбции металлов сульфоэтилированными полиаминостиролами и их анализ по известным теоретическим моделям.
6. Установление закономерностей динамического концентрирования ионов серебра (I) сорбентами на основе сульфоэтилированных полиаминостиролов и полиаллиламинов.
7. Исследование регенерационных свойств сульфоэтилированных полиаминостиролов и полиаллиламинов.

8. Сравнительная характеристика физико-химических свойств четырех матриц сульфозетилированных полимеров (хитозана, полиэтиленimina, полиаминостирола и полиаллиламина) с целью выбора наиболее перспективного варианта сорбента для практического использования при разделении и концентрировании ионов благородных металлов из сложных по составу объектов.

Научная новизна:

1. Впервые определены константы кислотной ионизации аминогрупп в составе сульфозетилированных полиаминостирола и полиаллиламина, выявлено влияние полимерной матрицы на кислотно-основные свойства сорбентов.

2. Впервые установлена закономерность возрастания селективности сорбции серебра (I), палладия (II) и золота (III) с ростом степени сульфозетилирования полиаминостирола и полиаллиламина. На основании расчета коэффициентов селективности определены оптимальные для извлечения того или иного иона значения кислотности среды.

3. В результате исследования кинетики извлечения ионов металлов СЭПАА и СЭПАС определено время, соответствующее установлению равновесия сорбции золота (III), палладия (II) и серебра (I) из многокомпонентных систем. Показано, что сорбция ионов благородных металлов сульфозетилированными аминополимерами в большинстве случаев лимитируется стадией химического взаимодействия ионов металлов с функциональными группами сорбентов.

4. Впервые построены изотермы сорбции ионов переходных и щелочноземельных металлов СЭПАС. С использованием известных моделей (Фрейндлиха, Редлиха–Петерсона, Ленгмюра и т.д.) определены значения емкости сорбентов с разными степенями модифицирования по ионам металлов, а также параметры сорбента.

5. Впервые определены оптимальные условия (кислотность среды, скорость пропускания раствора, масса сорбента) селективной сорбции серебра (I) сульфозетилированными аминополимерами в динамических условиях.

6. Впервые определены условия количественной десорбции ионов золота (III), палладия (II) и серебра (I) с поверхности СЭПАА и СЭПАС.

Теоретическая и практическая значимость работы. Определенные в работе значения количественных характеристик сорбции (емкости, коэффициентов селективности, констант скорости сорбции и т.д.) ионов серебра (I), меди (II), никеля (II), кобальта (II), цинка (II), кадмия (II), магния (II), палладия (II), платины (IV), золота (III) СЭПАС и СЭПАА носят справочный характер и могут использоваться в том числе в учебном процессе при чтении лекций по дисциплинам, связанным с сорбционными процессами. Установленные закономерности влияния степени сульфозетилирования и природы полимерной матрицы сорбентов могут использоваться для прогнозирования и интерпретации свойств других сорбционных материалов на основе аминополимеров.

Установленные условия селективного концентрирования ионов благородных металлов СЭПАС и СЭПАА могут лечь в основу разработки методик их сорбционно-спектроскопического определения в составе различных объектов, а также технологических процессов разделения и концентрирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Данные о кислотно-основных свойствах сорбентов на основе сульфозетилированного полиаминостирола и полиаллиламина с различными степенями модифицирования.

2. Физико-химические закономерности влияния различных факторов на селективность извлечения ионов серебра (I), палладия (II), золота (III) и платины (IV) СЭПАС и СЭПАА из растворов сложного состава в статических и динамических условиях в зависимости от степени модифицирования аминополимеров.

3. Возможный механизм сорбции ионов благородных металлов СЭПАА и СЭПАС.

4. Количественные характеристики процесса сорбции ионов металлов сульфозетилированными аминополимерами: константы скорости сорбции, сорбционные емкости, параметры сорбента.

5. Рекомендации по применению сульфозетилированных сорбентов на основе полиаминостирола и полиаллиламина в процессах разделения и концентрирования ионов благородных металлов.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность представленных в диссертационной работе результатов подтверждается применением современных методов исследования и использованием поверенного современного оборудования, такого как иономеры, атомные спектрометры и государственных стандартных образцов. Рассчитанные значения констант кислотной ионизации, сорбционных параметров характеризуются высокой воспроизводимостью и согласуются с данными, представленными в литературных источниках. Основные результаты настоящей работы были представлены и обсуждены на Третьем съезде аналитиков России (Москва, 2017 г.), XVII Всероссийской молодежной научной конференции с элементами научной школы «Функциональные материалы: синтез, свойства, получение» (Санкт-Петербург, 2018 г.), V Всероссийском симпозиуме «Разделение и концентрирование в аналитической химии и радиохимии» (Краснодар, 2018 г.), XXI Менделеевском съезде по общей и прикладной химии (Санкт-Петербург, 2019 г.), XXII Международной Чернявской конференции по химии, аналитике и технологии платиновых металлов (Москва, 2019 г.), IV Всероссийской конференции «Аналитическая хроматография и капиллярный электрофорез» с международным участием (Краснодар, 2020 г.), VIII Международной молодежной научной конференции «Физика. Технологии. Инновации. ФТИ-2021» (Екатеринбург, 2021 г.).

Личный вклад автора заключался в планировании и проведении экспериментальных исследований, обработке и интерпретации полученных результатов, написании и подготовке публикаций вместе с соавторами.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 13 работ, в том числе 6 статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ, входящих в международные базы Scopus и Web of Science, 7 – в виде тезисов докладов всероссийских и международных конференций.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, основных выводов и списка литературы, содержащего 211 библиографических ссылок. Текст работы изложен на 130 страницах, включает в себя 31 рисунок и 43 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы ее цель и задачи, изложены новизна и практическая значимость исследования, представлены положения, выносимые на защиту, описаны степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе представлены литературные данные по основным физико-химическим и сорбционным характеристикам материалов на основе синтетических полимерных матриц. Показано, что широкое практическое применение нашли сорбенты на основе сополимера стирола и дивинилбензола, которые являются групповыми по отношению к ионам благородных металлов. Рассмотрены уравнения, используемые для математического моделирования сорбционных процессов.

Во второй главе представлены объекты, изученные в настоящей работе, и описаны экспериментальные методы исследования. Сульфэтилированные аминополимеры – полиаминостирол (СЭПАС) и полиаллиламин (СЭПАА) – были синтезированы в Институте органического синтеза УрО РАН под руководством к. х. н. А. В. Пестова. СЭПАС со степенями модифицирования (СМ) 0.5, 0.7 и 1.0 и СЭПАА со степенями модифицирования (СМ) 0.5 и 1.0 получен путем полимераналогичных превращений полиаминостирола [3] и полиаллиамина [4] соответственно. Для получения сорбентов на основе СЭПАА проведено сшивание полимеров эпихлоргидрином.

Стандартные растворы нитратов меди (II), никеля (II), кобальта (II), цинка (II), кадмия (II), кальция (II), магния (II), стронция (II), бария (II), серебра (I) и исследуемых реагентов готовили растворением точной навески в дистиллированной/деионизованной воде в мерной колбе соответствующей вместимости. Растворы хлоридов золота (III), платины (IV), палладия (II) готовили из навесок соответствующих металлов путем растворения в смеси концентрированных азотной : соляной кислот (1:3) с последующим разбавлением дистиллированной водой до необходимого объема по методикам [5, 6].

Для исследования сорбции ионов металлов сульфэтилированными аминополимерами из растворов различного состава в статических условиях эксперимент проводили методом ограниченного объема. Свойства сорбентов в динамических условиях изучали путем пропускания исходного раствора через концентрирующий патрон с определенной скоростью. Выходящий раствор собирали порциями. Значения рН растворов, содержащих ионы серебра (I), создавали аммиачно-ацетатным буферным раствором, содержащих ионы платины (IV), палладия (II), золота (III) – растворами гидроксида калия и хлороводородной кислоты с помощью иономера И-160МИ, оснащенного стеклянным комбинированным электродом ЭСК-10601/7. Концентрацию ионов металлов до и после сорбции, после десорбции определяли методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии (спектрометры iCAP 6500, Solaar M6, соответственно).

Параметры, характеризующие равновесие сорбции ионов металлов СЭПАС определяли путем обработки изотерм сорбции как известными теоретическими моделями Ленгмюра, Фрейндлиха, Редлиха–Петерсона и Ленгмюра–Фрейндлиха. Моделирование кинетических кривых сорбции ионов металлов СЭПАС и СЭПАА проводили с использованием уравнений диффузионной и химической кинетики.

Исследование кислотно-основных свойств сульфэтилированных полиаминоستيрилов и полиаллиаминов с разными степенями модифицирования проведено методом потенциометрического титрования. Значения обменной емкости по гидроксид-ионам СЭПАС и СЭПАА и значения констант кислотной ионизации определены по данным кислотно-основного титрования.

В третьей главе исследованы кислотно-основные свойства сульфэтилированных полиаминоستيрилов и полиаллиаминов со степенями модифицирования от 0.5 до 1.0. Определены значения статической и динамической обменных емкостей сульфэтилированных аминополимеров по гидроксид-ионам. Установлено, что обменная емкость СЭПАС по гидроксид-ионам в статических и динамических условиях с увеличением степени модифицирования уменьшается от 2.32 ± 0.01 до 2.30 ± 0.01 ммоль/г, от 2.06 ± 0.01 до 2.01 ± 0.01 ммоль/г соответственно. Обменная емкость СЭПАА по гидроксид-ионам в статических и динамических условиях с увеличением степени модифицирования уменьшается от 2.00 ± 0.01 до 1.37 ± 0.01 ммоль/г, от 2.72 ± 0.01 до 2.67 ± 0.01 ммоль/г соответственно.

Получены значения показателей констант ионизации аминогрупп (pK_a) сульфэтилированных полиаминоستيрилов и полиаллиламинов. Значения pK_a в зависимости от увеличения степени модифицирования для СЭПАС изменяются от 6.43 ± 0.03 до 5.66 ± 0.01 , для СЭПАА – от 5.91 ± 0.01 до 5.17 ± 0.03 . Установлено, что увеличение содержания сульфэтильных групп в составе изученных сорбентов приводит к уменьшению основности атомов азота аминогруппы.

В четвертой главе изучены сорбционные свойства материалов на основе сульфотилированных полиаминоэтиролов и полиаллиламинов по отношению к ионам переходных и щелочноземельных металлов.

Изучено влияние кислотности среды на сорбцию ионов металлов СЭПАС и СЭПАА из аммиачно-ацетатных буферных растворов, установлено, что в большей степени СЭПАС извлекает ионы серебра (I) в интервале pH 5.5–6.0, СЭПАА – извлекает ионы серебра (I) в интервале pH 4.0–7.0 (рис. 1). Сорбция ионов меди (II), кадмия (II), никеля (II), кобальта (II), цинка (II), кальция (II), магния (II), бария (II), стронция (II) в значительной степени подавляется.

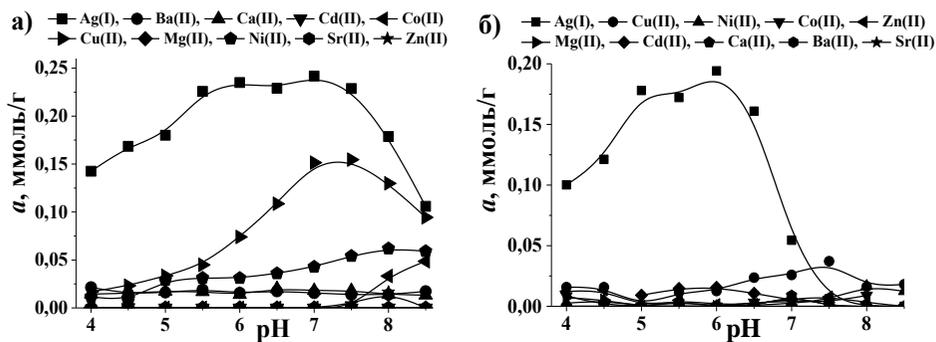


Рисунок 1 – Извлечение ионов металлов СЭПАС (а), СЭПАА (б) в зависимости от pH. Аммиачно-ацетатный буферный раствор. Исходная концентрация ионов металлов $1 \cdot 10^{-4}$ моль/дм³, m (сорбента)=0.0200 г

С одной стороны, СЭПАС и СЭПАА (см. рис. 1) обладают схожими селективными свойствами и характеризуются общей закономерностью возрастания селективности сорбции серебра (I) в присутствии меди (II) с ростом степени модифицирования. С другой – СЭПАА отличается меньшей степенью извлечения меди (II) и, как следствие, существенно большими значениями коэффициентов селективности $K_{Ag(I)/Cu(II)}$ (см. табл. 1). Это обстоятельство объясняется несколькими факторами. Во-первых, СЭПАА обладает наименее низкой основностью аминогрупп по сравнению с СЭПАС. Во-вторых, с учетом того, что ионы металлов, как правило, координируют несколько функциональных групп сорбента, возможность эффективного связывания сорбентом ионов металла зависит от способности полимерной матрицы к определенной пространственной ориентации функциональных групп [5].

Таблица 1 – Коэффициенты селективности сорбции ионов серебра (I) относительно ионов меди (II) сульфозетилированными аминополимерами из аммиачно-ацетатных буферных растворов

рН	$K_{Ag(I)/Cu(II)}$							
	СМ СЭПАС		СМ СЭПАА		СМ СЭХ [1]		СМ СЭПЭИ [2]	
	0.5	1.0	0.5	1.0	0.3	1.0	0.34	0.74
4.0	-	-	-	-	-	-	0.10	2.33
4.5	-	-	$\gg 10^3$	15	-	-	0.17	0.71
5.0	-	-	443	$\gg 10^3$	-	-	0.71	0.63
5.5	34.7	213	173	262	-	-	0.71	0.32
6.0	30.8	268	93	130	1.8	16.6	1.59	0.14
6.5	23.2	11.5	79	16	1.3	20	2.12	0.1
7.0	26.2	8.3	12	2.9	3.0	17.3	-	-
7.5	9.8	7.4	-	-	-	-	-	-

Из данных таблицы 1 видно, что исследуемые в настоящей работе сорбенты характеризуются значительно большей селективностью сорбции серебра (I) из растворов сложного состава по сравнению с сульфозетилированным хитозаном (СЭХ) [1] и сульфозетилированным полиэтиленимином (СЭПЭИ) [8]. В случае СЭХ меньшая селективность извлечения ионов серебра (I) может объясняться наличием в его составе гидроксильных групп, отвечающих за дополнительное извлечение ионов меди (II) по сравнению с СЭПАС и СЭПАА. В случае СЭПЭИ меньшая селективность извлечения ионов серебра (I) связана с тем, что в его составе функциональные группы расположены наиболее благоприятно для взаимодействия с двухзарядными ионами переходных металлов, образующими плоскоквадратные и октаэдрические комплексы.

Для изучения кинетики сорбции выбраны условия, отвечающие наибольшей избирательности извлечения: аммиачно-ацетатный буферный раствор с рН 6.0 для СЭПАС, с рН 5.0 – для СЭПАА. Получены интегральные кинетические кривые сорбции ионов металлов СЭПАС и СЭПАА с разными СМ, которые обработаны математически уравнениями диффузионной и химической кинетики. Установлено лимитирующее влияние химической реакции между ионами металлов и функциональными группами сорбентов на скорость сорбционного процесса. Равновесие в системе «раствор ионов металлов – сорбент» во всех случаях устанавливается в течении 30 минут.

Получены экспериментальные изотермы сорбции ионов серебра (I), меди (II), никеля (II), цинка (II), кобальта (II), кадмия (II) и магния (II) СЭПАС со степенями модифицирования 0.5 и 1.0 при индивидуальном присутствии ионов металлов в растворе (рисунок 2).

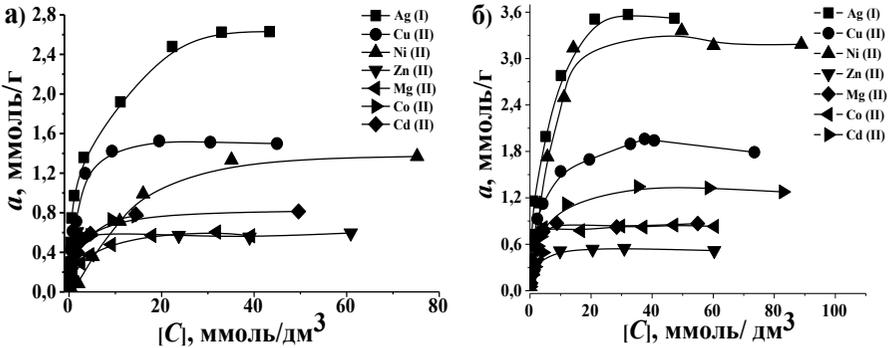


Рисунок 2 – Изотермы сорбции ионов металлов при индивидуальном присутствии в растворе СЭПАС (а – СЭПАС 0.5, б – СЭПАС 1.0), построенные по десорбции 1 моль/дм³ HNO₃, аммиачно-ацетатный буферный раствор, pH=6.0, T 298±2 К.

Экспериментальные изотермы сорбции обработаны математически уравнениями индивидуальной сорбции (Ленгмюра, Фрейндлиха, Редлиха–Петерсона и Ленгмюра–Фрейндлиха). В таблице 2 приведены значения сорбционной емкости СЭПАС 1.0 по ионам металлов (a_{\max} , ммоль/г), а также значения параметра K_F ((ммоль/г)·(дм³/ммоль)^{1/n}), уравнения Фрейндлиха, который является количественной мерой сродства сорбата к поверхности сорбента.

Таблица 2 – Некоторые константы изотермы сорбции для СЭПАС 1.0

Модель	Параметр	Ag(I)	Cu(II)	Ni(II)	Co(II)	Zn(II)	Cd(II)	Mg(II)
Ленгмюра	a_{\max}	3.82	1.98	3.62	0.85	1.41	0.89	0.56
Фрейндлиха	K_F	694	115	20	0	28	0	4.0

По значениям емкости, полученным при обработке изотерм сорбции уравнением Ленгмюра, можно сделать вывод, что в наибольшей степени из индивидуальных растворов сульфозетилированными полиаминостиролами сорбируются ионы серебра (I), меди (II) и никеля (II). Сорбция остальных ионов металлов не превышает 1.41 ммоль/г. При этом наблюдается зависимость возрастания значений сорбционной емкости при увеличении степени модифицирования СЭПАС.

Сравнительный анализ коэффициентов корреляции показывает, что наилучшим образом экспериментальные данные описываются уравнением Ленгмюра–Фрейндлиха для всех ионов металлов. Это может свидетельствовать, с одной стороны, о реализации мономолекулярной сорбции, а с другой стороны, указывать на энергетическую неоднородность поверхности СЭПАС.

На основании исследования сорбции серебра (I) и меди (II) СЭПАС и СЭПАА из бинарных растворов определены оптимальные условия, отвечающие наибольшей

селективности сорбции серебра (I) в динамических условиях (рН 5.0–6.0, масса сорбента 0.0500–0.1000 г, скорость пропускания раствора 2 см³/мин). Получены динамические выходные кривые сорбции ионов переходных и щелочноземельных металлов сульфозетилированными аминополимерами. На рисунке 3 в качестве примера приведены соответствующие зависимости для СЭПАС 1.0 и СЭПАА 1.0. По динамическим выходным кривым рассчитаны динамические обменные емкости (ДОЕ) сорбентов по ионам металлов и приведены в таблицах 3, 4.

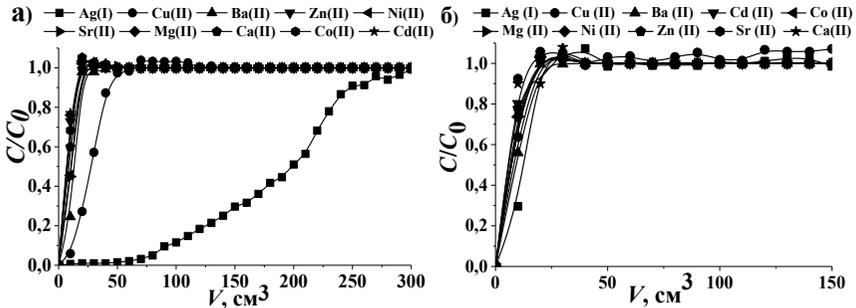


Рисунок 3 – Динамические выходные кривые сорбции ионов переходных и щелочноземельных металлов СЭПАС 1.0 (а) и СЭПАА 1.0 (б). Совместное присутствие ионов металлов в растворе. Исходная концентрация ионов металлов $1 \cdot 10^{-4}$ моль/дм³. Аммиачно-ацетатный буферный раствор, рН 5.0–6.0

Таблица 3 – Влияние степени модифицирования полиаминостирола на значения ДОЕ по ионам металлов и коэффициентов селективности $K_{Ag(I)/Cu(II)}$ в условиях конкурентной сорбции. Аммиачно-ацетатный буферный раствор, рН 6.0

СМ	ДОЕ, мкмоль/г								
	Ag(I)	Cu(II)	Ni(II)	Co(II)	Zn(II)	Cd(II)	Mg(II)	Sr(II)	Ba(II)
0.5	459	86	2.6	0	23	0	8.3	8.3	23
0.7	694	115	20	0	28	0	4.0	17	28
1.0	759	87	28	0	14	6.3	8.8	38	36

Таблица 4 – Влияние степени модифицирования полиаллиламина на значения ДОЕ по ионам металлов и коэффициентов селективности $K_{Ag(I)/Cu(II)}$ в условиях конкурентной сорбции. Аммиачно-ацетатный буферный раствор, рН 5.0

СМ	ДОЕ, мкмоль/г								
	Ag(I)	Cu(II)	Ni(II)	Co(II)	Zn(II)	Cd(II)	Mg(II)	Sr(II)	Ba(II)
0.5	14.3	0.82	0.79	0.84	0.68	0.63	0.44	0.82	0.69
1.0	5.07	0.44	2.15	4.48	1.96	1.63	1.96	2.92	3.33

Установлено, что увеличение степени модифицирования сорбентов сульфозильными группами приводит к значительному возрастанию ДОЕ СЭПАС по ионам серебра (I). ДОЕ по сопутствующим ионам металлов являются существенно меньшими и изменяются немонотонно с ростом степени модифицирования СЭПАС. В случае ионов бария (II), стронция (II), кальция (II) и магния (II) наблюдается возрастание ДОЕ с увеличением содержания сульфозильных групп в составе сорбента, что позволяет сделать вывод о том, что эти ионы извлекаются за счет электростатического взаимодействия с рассматриваемыми группами. С возрастанием степени модифицирования СЭПАА в большинстве случаев увеличивается мешающее влияние сопутствующих ионов металлов на сорбцию ионов серебра (I). Более высокая степень извлечения сопутствующих ионов металлов СЭПАА 1.0 по сравнению с СЭПАА 0.5 позволяет сделать предположение о том, что рассматриваемые ионы металлов извлекаются преимущественно за счет ионного обмена с участием сульфогрупп, протекающего более быстро по сравнению с комплексообразованием.

В результате математической обработки уравнениями Юна–Нельсона, Томаса, Адамса–Бохарта полученных динамических выходных кривых сорбции ионов металлов СЭХ получены такие параметры как время выхода 50 % сорбата, емкость сорбента и константы скорости сорбции. Наиболее близкими к экспериментальным данным являются ДОЕ, рассчитанные путем обработки кривых уравнением Томаса, что согласуется с соответствующими коэффициентами детерминации.

Установлено, что с поверхности сорбентов ионы серебра(I) в динамических условиях полностью десорбируются 1 моль/дм³ раствором азотной кислоты.

Пятая глава посвящена исследованию сорбции ионов благородных металлов материалами на основе сульфозетилированных аминополимеров. Изучено влияние кислотности среды на извлечение золота (III), платины (IV), палладия (II) из индивидуальных, бинарных и многокомпонентных систем (рисунки 4, 5).

Анализируя значения коэффициентов селективности, представленные в таблице 5, можно заключить, что все сорбенты на основе сульфозетилированных аминополимеров характеризуются общей закономерностью возрастания селективности сорбции золота (III) и палладия (II) по отношению к платине (IV) с ростом степени модифицирования сорбента. При этом во многих случаях извлечение золота (III) и палладия (II) этими сорбентами возрастает с ростом pH, что указывает на преобладание в механизме сорбции процесса комплексообразования ионов металлов с функциональными группами модифицированных аминополимеров. В тоже время в селективных свойствах рассматриваемых металлов можно проследить и существенные отличия. Так, СЭХ по сравнению с другими сорбентами проявляет высокую селективность извлечения золота (III) по отношению к палладию (II). СЭПЭИ в зависимости от кислотности раствора способен проявлять большую селективность или к золоту (III), или к палладию (II). В отличие от СЭХ и СЭПЭИ СЭПАС позволяет в широком диапазоне pH селективно извлекать золото (III) и палладий (II) в присутствии

ряда сопутствующих металлов. Особенностью же СЭПАА является восстановление золота (III) в фазе сорбента после сорбции. Однако данный материал с максимальной степенью модифицирования может быть рекомендован для селективного отделения палладия (II) от платины (IV) и других сопутствующих ионов металлов: по сравнению с другими сульфозетилированными аминополимерами СЭПАА 1.0 выгодно отличается наибольшими коэффициентами селективности сорбции $K_{Pd(II)/Pt(IV)}$.

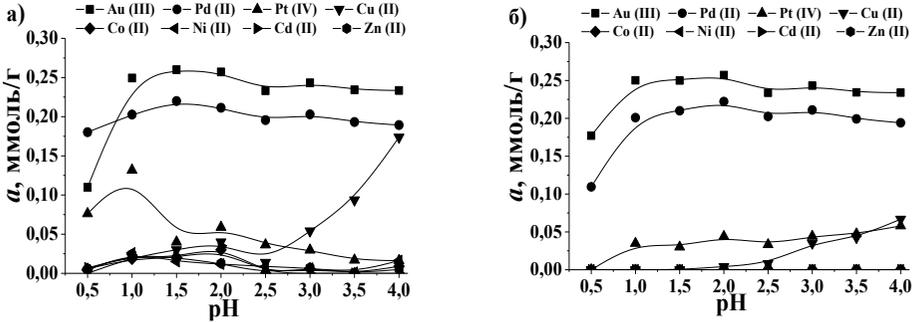


Рисунок 4 – Влияние степени модифицирования СЭПАС (а – СЭПАС 0.5, б – СЭПАС 1.0) на селективность сорбции хлоридных комплексов ионов благородных металлов в присутствии ионов переходных металлов. Исходная концентрация ионов металлов $1 \cdot 10^{-4}$ моль/см³, m (СЭПАС)=0.0200 г

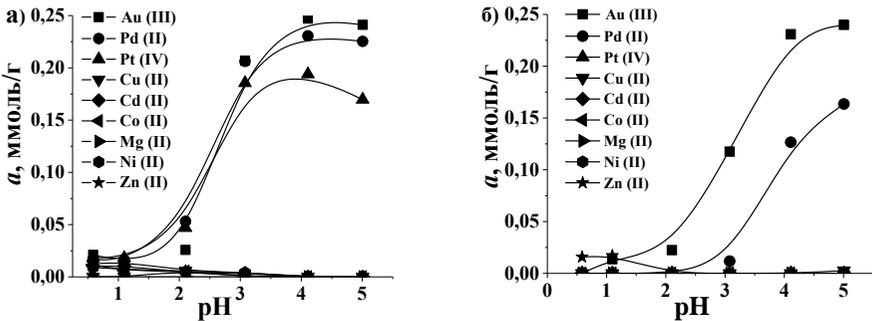


Рисунок 5 – Влияние степени модифицирования СЭПАА (а – СЭПАА 0.5, б – СЭПАА 1.0) на селективность сорбции хлоридных комплексов ионов благородных металлов в присутствии ионов переходных металлов. Исходная концентрация ионов металлов $1 \cdot 10^{-4}$ моль/дм³, m (СЭПАА)=0.0200 г

Таблица 5 – Коэффициенты селективности сорбции ионов благородных металлов сульфозетилированными аминополимерами из многокомпонентных систем

Сорбент	СМ	$K_{Pd(II)/Pt(IV)}, C_{исх}(Me)=1 \cdot 10^{-4}$ моль/дм ³						
		pH 1.0	pH 2.0	pH 3.0	pH 4.0	pH 5.0		
СЭХ [1]	0.3	1.6	13	19	31	25		
	1.0	1.1	6.4	26	59	100		
		$K_{Au(III)/Pd(II)}, C_{исх}(Me)=5 \cdot 10^{-4}$ моль/дм ³						
		pH 0.5	pH 0.9	pH 2.2	pH 3.5	pH 4.5		
	0.3	7.6	13	640	270	290		
	1.0	2.4	5.5	16	500	$\geq 10^3$		
		$K_{Au(III)/Pt(IV)}, C_{исх}(Me)=5 \cdot 10^{-4}$ моль/дм ³						
	0.3	10	20	$\geq 10^3$	$\geq 10^3$	$\geq 10^3$		
1.0	9.3	11	34	≥ 103	≥ 103			
СЭПЭИ [2]		$K_{Au(III)/Pd(II)}, C_{исх}(Me)=5 \cdot 10^{-4}$ моль/дм ³						
		pH 0.5	pH 0.9	pH 2.2	pH 3.5	pH 4.5		
	0.34	0.03	5.71	44.1	106	37.5		
	0.74	0.005	0.01	6.76	58.5	65.6		
		$K_{Au(III)/Pt(IV)}, C_{исх}(Me)=5 \cdot 10^{-4}$ моль/дм ³						
	0.34	0.43	26.7	72.6	37.9	34.7		
0.74	1.01	4.13	169	646	973			
СЭПАС		$K_{Au(III)/Pt(II)}, C_{исх}(Me)=1 \cdot 10^{-4}$ моль/дм ³						
		pH 0.97	pH 1.45	pH 2.52	pH 3.05	pH 3.51	pH 4.01	pH 4.30
	0.5	1.4	136	2590	1420	10790	21454	4340
	1.0	-	5902	5997	6648	7434	7326	5558
		$K_{Pd(II)/Pt(IV)}, C_{исх}(Me)=1 \cdot 10^{-4}$ моль/дм ³						
	0.5	13	26	47	117	143	341	420
	1.0	-	156	662	1447	1849	5749	1696
СЭПАА		$K_{Au(III)/Pt(II)}, C_{исх}(Me)=1 \cdot 10^{-4}$ моль/дм ³						
		pH 2.09	pH 3.04	pH 4.00	pH 5.01			
	0.5	54.7	2.8	2.0	3.5			
	1.0	$\gg 10^3$	$\gg 10^3$	$\gg 10^3$	$\gg 10^3$			
		$K_{Pd(II)/Pt(IV)}, C_{исх}(Me)=1 \cdot 10^{-4}$ моль/дм ³						
	0.5	14.0	0.88	0.61	1.45			
1.0	13.8	$\gg 10^3$	$\gg 10^3$	$\gg 10^3$				

При математической обработке полученных интегральных кинетических кривых сорбции ионов металлов СЭПАС и СЭПАА (рисунки 6, 7) уравнениями химической и диффузионной кинетики определена скорость-лимитирующая стадия сорбции – протекание химической реакции между функциональными группами сорбентов и ионами металлов.

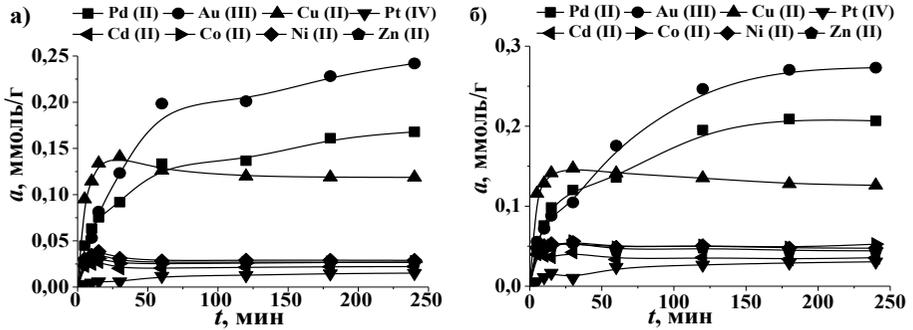


Рисунок 6 – Интегральные кинетические кривые сорбции ионов металлов СЭПАС (а – СЭПАС 0.5, б – СЭПАС 1.0) при их совместном присутствии в растворе при pH 3.5. Исходная концентрация ионов металлов $1 \cdot 10^{-4}$ моль/дм³, m (СЭПАС)=0.0200 г

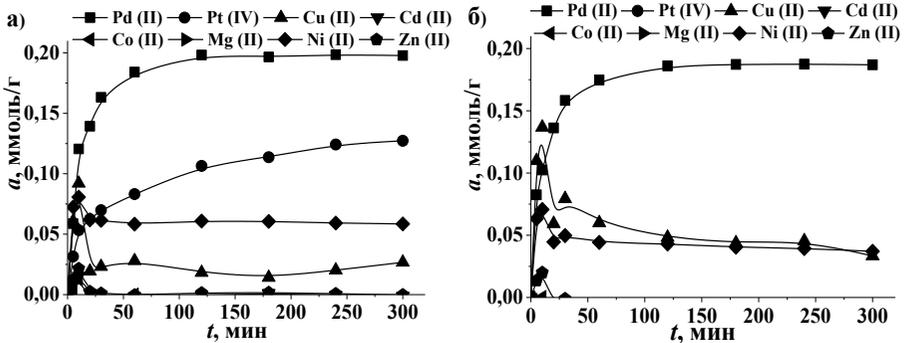


Рисунок 7 – Интегральные кинетические кривые сорбции ионов металлов СЭПАА (а – СЭПАА 0.5, б – СЭПАА 1.0) при их совместном присутствии в растворе при pH 4.0. Исходная концентрация ионов металлов $1 \cdot 10^{-4}$ моль/дм³, m (СЭПАА)=0.0200 г

Поскольку золото (III) восстанавливается в фазе СЭПАА, кинетику его сорбции исследовали из индивидуальных растворов. Восстановление золота (III) в фазе сорбентов визуально отмечалось по истечении 60 минут контакта фаз в случае СЭПАА 0.5 и 45 минут в случае СЭПАА 1.0.

Регенерационные свойства СЭПАС и СЭПАА исследовались при использовании растворов различных регенерантов. Показано, что палладий количественно десорбируется с поверхности СЭПАА 30.0 см³ 3.5 моль/дм³ соляной кислоты, платина – 30.0 см³ 1 % раствора тиомочевины в 2 моль/дм³ HCl. Установлено, что в случае СЭПАА 1.0 количественная десорбция золота достигается при использовании двух циклов десорбции 1 % раствором тиомочевины в 3 моль/дм³ HCl при нагревании.

В отличие от СЭПАА в случае СЭПАС количественная десорбция всех исследуемых металлов (золота, палладия, платины) достигается с применением 30.0 см³ 1 % раствора тиомочевины в 3.5 моль/дм³ HCl. Сорбция ионов металлов при этом не сопровождается изменением окраски сорбента, что в совокупности с данными исследования десорбции свидетельствует об отсутствии протекания в фазе СЭПАС окислительно-восстановительных процессов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Определены значения статической и динамической обменных емкостей сульфозетилованных аминополимеров по гидроксид-ионам и их степени набухания. Показано, что с увеличением степени модифицирования СЭПАС значения SO_{OH^-} и DO_{OH^-} изменяются незначительно, но при этом увеличивается коэффициент влагоемкости сорбента. Для СЭПАА SO_{OH^-} и DO_{OH^-} уменьшаются с увеличением его степени модифицирования.
2. Выявлена закономерность уменьшения основности аминогрупп исследуемых сорбентов с увеличением степени модифицирования аминополимеров. Величина рКа изменяется от 6.43 до 5.66 и от 5.91 до 5.17 с увеличением степени модифицирования СЭПАС и СЭПАА от 0.5 до 1.0, соответственно.
3. Показано, что с увеличением степени модифицирования СЭПАС и СЭПАА увеличивается селективность сорбции ионов серебра (I) по отношению к меди (II) в статических условиях из многокомпонентных аммиачно-ацетатных буферных растворов. При исследовании сорбции палладия (II), платины (IV) и золота (III) в статических условиях СЭПАС установлено, что степень модифицирования полиаминостирола в значительной мере влияет только на извлечение хлоридных комплексов ионов платины (IV) из индивидуальных растворов. Определены оптимальные значения рН для сорбции ионов благородных металлов СЭПАС. При исследовании сорбции платины (IV), палладия (II) и золота (III) из бинарных и многокомпонентных растворов СЭПАС и СЭПАА установлено, что селективность сорбции палладия (II) и золота (III) по отношению к платине (IV) возрастает с ростом степени модифицирования сорбентов.
4. Установлено, что сорбенты в наибольшей степени извлекают ионы меди (II) и серебра (I), при этом 30 минут контакта фаз достаточно для установления равновесия в системе «сорбент - раствор солей металлов». Для достижения равновесия сорбции палладия (II) и золота (III) сульфозетилованными аминополимерами из многокомпонентных растворов требуется для СЭПАС 180 минут, для СЭПАА 0.5 – 240 минут, для СЭПАА 1.0 – 120 минут. Показано, что скорость процесса сорбции исследуемых ионов металлов СЭПАС и СЭПАА лимитируется стадией химического взаимодействия исследуемых ионов металлов с функциональными группами сорбента.

5. В результате построения изотерм сорбции ионов серебра (I), кадмия (II), меди (II), никеля (II), кобальта (II), магния (II) и цинка (II) СЭПАС 0.5 и СЭПАС 1.0 при их индивидуальном присутствии в растворе установлено, что исследуемые сорбенты обладают наибольшей емкостью и характеризуется наибольшим сродством по отношению к серебру (I), никелю (II), меди (II). Выбраны модели, которые наилучшим образом описывают изотермы сорбции исследуемых ионов металлов. Наилучшее соответствие между экспериментальными и теоретическими данными в случае СЭПАС 0.5 и СЭПАС 1.0 получено для модели Ленгмюра-Фрейндлиха для всех ионов металлов.

6. Установлено, что в динамических условиях наибольшей степени извлечения и селективности сорбции серебра (I) отвечает аммиачно-ацетатный буферный раствор с рН 6.0 для СЭПАС, с рН 5.0 для СЭПАА. Выявлена закономерность увеличения динамической емкости и селективности сорбции ионов серебра (I) СЭПАС с увеличением степени его модифицирования в динамических условиях в присутствии ряда сопутствующих ионов металлов. Показано, что в случае полиаллиламина большей селективностью сорбции серебра (I) в динамических условиях характеризуется СЭПАА 0.5 по сравнению с СЭПАА 1.0. Путем математической обработки динамических выходных кривых сорбции ионов серебра (I) и меди (II) СЭПАС и серебра (I) СЭПАА определены значения параметров сорбции, в том числе значения констант скорости и динамической емкости по исследуемым ионам металлов.

7. Установлено, что количественная десорбция ионов серебра (I), палладия (II) и платины (IV) с поверхности СЭПАС и СЭПАА достигается при использовании в качестве регенеранта 1.0 моль/дм³ раствора азотной кислоты в динамических условиях, 3.5 моль/дм³ раствора хлороводородной кислоты и 1 %-ого раствора тиомочевины в 2-3.5 моль/дм³ соляной кислоте в статических условиях, соответственно. Показано, что десорбция золота с поверхности СЭПАА осложняется окислительно-восстановительными процессами, протекающими в фазе сорбентов при его сорбции. Оптимальным способом регенерации в данном случае является использование двух циклов десорбции 1 % раствором тиомочевины в 3 моль/дм³ соляной кислоте.

8. На основании сравнения свойств СЭПАС и СЭПАА со свойствами других сульфозетилированных аминополимеров выявлены наиболее перспективные производные для извлечения тех или иных ионов благородных металлов. Так, СЭПАС 1.0 и СЭПАА 1.0 могут быть рекомендованы для селективного концентрирования серебра (I) из многокомпонентных растворов в динамических и статических условиях соответственно. В то же время СЭПАС по сравнению с другими сульфозетилированными аминополимерами позволяет количественно извлекать палладий (II) и золото (III) из солянокислых растворов в широком диапазоне рН. СЭПАА 1.0 также может быть рекомендован для селективного концентрирования палладия (II) в присутствии платины (IV) и ряда сопутствующих ионов металлов.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования. Исследованные в данной работе сорбенты – сульфозетилированные полиаминоستيрылы и полиаллиламины, продемонстрировали высокую селективность при извлечении металлов платиновой группы и серебра из водных растворов. Отсюда следует, что они могут быть использованы для разработки сорбционно-спектроскопических методик их определения на фоне сопутствующих ионов переходных и щелочноземельных металлов. Будут разрабатываться методики определения металлов платиновой группы и серебра в следовых количествах, отличающиеся высокой точностью определения. Такие разработки могут быть использованы при анализе руд цветных металлов, сплавов или отходов предприятий по переработке драгоценных металлов.

Цитируемая литература

1. Петрова, Ю.С. Физико-химические свойства и аналитическое применение сульфозетилированного хитозана для определения меди и серебра : дис. ... канд. хим. наук : 02.00.02 / Петрова Юлия Сергеевна. Екатеринбург, 2014. 181 с.
2. Капитанова, Е.И. Разделение и концентрирование ионов металлов на сульфозетилированных аминополимерах : дис. ... канд. хим. наук : 1.4.4 / Капитанова Елена Ивановна. Екатеринбург, 2021. 147 с.
3. Петрова, Ю.С. Сульфозетилированный полиаминостирол: синтез в геле и селективность сорбции ионов серебра (I) и меди (II) / Ю.С. Петрова, Л.М.к. Алифханова, Л.К. Неудачина [и др.] // Журнал прикладной химии. 2016. Т. 89. № 9. С. 1211–1216.
4. Alifkhanova, L.M.k. Sulfoethylated poly(allylamine) - a new highly selective sorbent for removal of silver(I) ions in the presence of copper(II) ions / L.M.k. Alifkhanova, K.Ya. Lopunova, A.V. Pestov [et al.] // Separation Science and Technology. 2021. V. 56. № 8. P. 1303–1311.
5. Коростелев, П.П. Приготовление растворов для химико-аналитических работ / П.П. Коростелев. М. : Наука, 1964. 399 с.
6. Лазарев, А.И. Справочник химика-аналитика / А.И. Лазарев, И.П. Харламов, П.Я. Яковлев. М. : Металлургия, 1976. 184 с.
7. Москвин, Л.Н. Методы разделения и концентрирования в аналитической химии / Л.Н. Москвин, О.В. Родинков. – Долгопрудный : Издательский дом «Интеллект», 2011. – 352 с.
8. Капитанова, Е.И. Сульфозетилированный полиэтиленимин: синтез в геле и сорбционные свойства / Е.И. Капитанова, Е.О. Землякова, А.В. Пестов [и др.] // Известия Академии наук. Серия химическая. 2019. № 6. С. 1252–1256.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ:

1. Петрова, Ю.С. Сульфоэтилированный полиаминостирол: синтез в геле и селективность сорбции ионов серебра (I) и меди (II) / Ю.С. Петрова, **Л.М.к. Алифханова**, Л.К. Неудачина, Д.В. Нестеров, А.В. Мехаев, А.В. Пестов // Журнал прикладной химии. – 2016. Т. 89. № 9. С. 1211–1216. Petrova, Yu.S. Sulfoethylated polyaminostyrene: Synthesis in a gel and selectivity of sorption of silver (I) and copper (II) ions / Yu.S. Petrova, **L.M.k. Alifkhanova**, L.K. Neudachina, D.V. Nesterov, A.V. Mekhaev, A.V. Pestov // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2016. V. 89. №9. P. 1500–1505. 0.31 п.л./0.05 п.л. (Scopus, Web of Science)
2. **Alifkhanova, L.M.k.** Sulfoethylated polyaminostyrene – polymer ligand with high selective interaction with silver ions in multicomponent solutions / **L.M.k. Alifkhanova**, A.V. Pestov, A.V. Mekhaev, A.A. Marchuk, S.N. Bosenko, Yu.S. Petrova, L.K. Neudachina // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2019. V. 7. № 1. № 102846. 1.4 п.л./0.5 п.л. (Scopus, Web of Science)
3. **Алифханова, Л.М.к.** Влияние степени сульфоэтилирования полиаминостирола на его кислотно-основные свойства и особенность взаимодействия с ионами переходных металлов / **Л.М.к. Алифханова**, О.И. Мережникова, Л.К. Неудачина, Д.В. Нестеров, А.В. Мехаев, А.В. Пестов // Журнал прикладной химии. – 2020. Т. 93, № 9. С.1345–1352. **Alifkhanova, L.M.k.** Effect of the degree of sulfoethylation of polyaminostyrene on its acid-basic properties and specificity of interaction with transition metal ions / **L.M.k. Alifkhanova**, O.I. Merezhnikova, Yu.S. Petrova, E.O. Zemlyakova, A.V. Pestov, L.K. Neudachina // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2020. V. 93. №9. P. 1392–1398. 0.38 п.л./0.06 п.л. (Scopus, Web of Science)
4. **Alifkhanova, L.M.k.** Sulfoethylated poly(allylamine) – a new highly selective sorbent for removal of silver (I) ions in the presence of copper (II) ions / **L.M.k. Alifkhanova**, K.Ya. Lopunova, A.V. Pestov, E.O. Zemlyakova, O.V. Kondratovich, Yu.S. Petrova, L.K. Neudachina // Separation Science and Technology. – 2021. V. 56. № 8. P. 1303–1311. 0.5 п.л./0.07 п.л. (Scopus, Web of Science)
5. **Алифханова, Л.М.к.** Выбор оптимальных условий динамического концентрирования ионов серебра(I) из растворов сложного состава сульфоэтилированными полиаминостиролами / **Л.М.к. Алифханова**, Ю.С. Петрова, С.Н. Босенко, А.В. Пестов, Л.К. Неудачина // Журнал неорганической химии. – 2021. Т. 66, № 4. С. 540–548. **Alifkhanova, L.M.k.** Choice of optimal conditions for the dynamic concentration of silver(I) ions from complex solutions with sulfoethylated polyaminostyrenes / **L.M.k. Alifkhanova**, Yu.S Petrova, S.N. Bosenko, A.V. Pestov, L.K. Neudachina // Russian Journal of Inorganic Chemistry. – 2021. V.66. №4. P. 578–585. 0.44 п.л./0.09 п.л. (Scopus, Web of Science)

6. **Алифханова, Л.М.к.**, Особенности сорбционного концентрирования ионов благородных металлов сульфозетилированными аминополимерами / **Л.М.к. Алифханова**, К.Я. Лопунова, А.А. Марчук, Ю.С. Петрова, А.В. Пестов, Л.К. Неудачина // Журнал неорганической химии. – 2021. Т. 66. № 6. С. 814–821. **Alifkhanova, L.M.k.** Features of sorption preconcentration of noble metal ions with sulfoethylated amino polymers / **L.M.k. Alifkhanova**, K.Ya. Lopunova, A.A. Marchuk, Yu.S. Petrova, A.V. Pestov, L.K. Neudachina // Russian Journal of Inorganic Chemistry. – 2021. V.66. №6. P. 909-915. 0.3750 п.л./0.0625 п.л. (Scopus, Web of Science)

Другие публикации:

1. **Алифханова Л.М.к.** Селективное концентрирование серебра (I) из растворов сложного состава сульфозетилированными полиаминоستيрами / **Л.М.к. Алифханова**, Ю.С. Петрова, Л.К. Неудачина, А.В. Пестов // Материалы Третьего съезда аналитиков России. 2017. Москва. С. 241. 0.0625 п.л./0.0156 п.л.
2. **Алифханова Л.М.к.** Излечение ионов благородных металлов из многокомпонентных растворов материалами на основе сульфозетилированного полиаминостирола / **Л.М.к. Алифханова**, А.А. Марчук, Ю.С. Петрова, Л.К. Неудачина // Сборник тезисов XVII Всероссийской молодежной научной конференции с элементами научной школы – «Функциональные материалы: синтез, свойства, применение». 2018 г. Санкт-Петербург. С. 179. 0.0625 п.л./0.0156 п.л.
3. **Алифханова Л.М.к.** Влияние кислотности среды на извлечение хлоридных комплексов золота (III) сульфозетилированным полиаминостиролом / **Л.М.к. Алифханова**, А.А. Марчук, Ю.С. Петрова, Л.К. Неудачина, А.В. Пестов // Материалы V Всероссийского симпозиума «Разделение и концентрирование в аналитической химии и радиохимии» с международным участием. 2018 г. Краснодар. С. 59. 0.0625 п.л./0.0125 п.л.
4. **Алифханова Л.М.к.** Сорбционные свойства материалов на основе сульфозетилированных аминополимеров / **Л.М.к. Алифханова**, К.Я. Лопунова, Ю.С. Петрова, Л.К. Неудачина // Тезисы докладов XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии в 6 томах, т. 4. Санкт-Петербург. 2019. С 235. 0.0625 п.л./0.0156 п.л.
5. **Алифханова Л.М.к.** Конкурентная сорбция хлоридных комплексов платины(IV) и палладия(II) в присутствии ионов переходных металлов сульфозетилированным полиаминостиролом / **Л.М.к. Алифханова**, Ю.С. Петрова, Л.К. Неудачина // Тезисы докладов XXII международной Черняевской конференции по химии, аналитике и технологии платиновых металлов. Москва. 2019. С. 64. 0.0625 п.л./0.0208 п.л.
6. Петрова Ю.С., Особенности селективного концентрирования ионов благородных металлов сульфозетилированными аминополимерами / Ю.С. Петрова, Е.И. Капитанова, **Л.М.к. Алифханова**, А.Р. Синельщикова, Л.К. Неудачина // Материалы IV Всероссийской конференции с международным участием «Аналитическая

хроматография и капиллярный электрофорез». Краснодар. 2020. С. 74. 0.0625 п.л./0.0125 п.л.

7. Кузнецова К.Я. Десорбция золота с поверхности сульфэтилированного полиаллиламина / К.Я. Кузнецова, Д.А. Гаврилова, **Л.М.к. Алифханова**, Ю.С. Петрова, Л.К. Неудачина // Материалы VIII Международной молодежной научной конференции «Физика. Технологии. Инновации». Екатеринбург. 2021. С. 602–603. 0.125 п.л./0.025 п.л.