

АДСОРБЕНТ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ СОПОЛИМЕРОВ ДИВИНИЛСУЛЬФИДА И 4-ВИНИЛПИРИДИНА

© Н. С. Шаглаева¹, Д. Б. Багинов¹, Е. Г. Филатова¹, Ю. Н. Пожидаев¹,
Т. А. Подгорбунская¹, Л. М. Станевич²

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет

² Иркутский государственный медицинский университет

E-mail: ShaglaevaNS@yandex.ru

Поступила в Редакцию 10 апреля 2018 г.

После доработки 25 сентября 2018 г.

Принята к публикации 27 сентября 2018 г.

Радикальной сополимеризацией дивинилсульфида с 4-винилпиридином синтезированы сополимеры пространственной структуры, имеющие в своей структуре «пиридиновые» атомы азота и сульфидную серу. Установлено, что сополимеры характеризуются высокими значениями статических сорбционных емкостей, которые для Au(III), Ag(I), Pt(IV) и Pd(II) достигают 1200, 340, 1040, 520 мг·г⁻¹ соответственно. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования дивинилсульфида в качестве сшивающего мономера при синтезе ионообменных смол.

Ключевые слова: дивинилсульфид, 4-винилпиридин, сополимеры, сорбционная емкость, ионообменные смолы.

DOI: 10.1134/S0044461819010109

Ионообменные смолы, или иониты, находят широкое применение в промышленности для извлечения благородных и редких металлов. Из 94 марок смол, допущенных к применению, в России выпускается только катионит КУ-2-8. Сырьевая база для синтеза смол постоянно сокращается, поэтому необходимо восстановление российского производства основных видов ионообменных смол на обновленной технологической платформе. Дивинилсульфид (ДВС) является одним из перспективных мономеров для создания ионообменных смол, поскольку наличие в каркасе полимерной матрицы атомов сульфидной серы ДВС («мягких» легкополяризуемых центров основности и комплексообразования) будет придавать иониту комплексообразующее сродство высокой селективности по отношению к редким и благородным металлам.

ДВС синтезируется реакцией ацетилен с сероводородом или сульфидом натрия [1, 2]. Главным преимуществом данного способа получения серосодержащего мономера является доступность и дешевизна исходных веществ. На основе ДВС получена серия ионитов со свойствами, значительно превосходящими существующие или принципиально новыми [3].

Радикальной сополимеризацией ДВС с 4-винилпиридином (ВП) осуществлен синтез ионита, содержащего в полимерной цепи «пиридиновый» атом азота и сульфидную серу, что обеспечивает высокую сорбционную активность продуктов сополимеризации по отношению к ионам благородных металлов. Подобным путем получены аниониты на основе ВП и технического дивинилбензола с сорбционной обменной емкостью 7.18 мэкв·г⁻¹ (0.1 М HCl), проведение аналогичной реакции с *n*-дивинилбензолом позволяет увеличить емкость ионита до 7.90 мэкв·г⁻¹ [4]. Способ получения дивинилбензола многостадийный и протекает с образованием изомеров дивинильного мономера, в то время как технология синтеза ДВС проста и осуществляется в одну стадию из ацетилен и сульфида калия в среде диметилсульфоксида с выходом 82%. Основное преимущество сорбентов ДВС–ВП перед сорбентом дивинилбензол–ВП заключается в простоте получения ДВС.

Склонность ионов благородных металлов к образованию устойчивых комплексов с N- и S-донорными лигандами [5] активно используется при создании сорбционных материалов. Так, функциональные смолы, содержащие гуанилтиомочевину, 2-меркапто-1-ме-

тилимидазол, проявили высокую селективность по отношению к золоту(I) и серебру(I) из аммиачных растворов. При этом они не сорбировали аммиачные комплексы меди(II). Кинетику сорбции золота(I) на этих смолах улучшали путем иммобилизации лигандов N,N-диметилэтанолamina, которые отвечали за повышение гидрофильности полимерного материала. Степень сорбции степени золота составляла 99.5% [6].

В качестве сорбентов для ионов Ag(I), Au(III), Pd(II) и Pt(II) исследовали серию из восемнадцати сополимеров 4-винилпиридина или 4-метил-4'-винилпипридина с различными сшивающими агентами. Такие хелатные полимеры обладают значительной селективностью сорбции для Au(III) по Ag(I) и Pd(II) по Pt(II) [7].

Новая хелатная смола была синтезирована из макрорезистентного полистирол-дивинилбензольного сополимера, включающего функциональную группу β -гидроксидитиокоричной кислоты. Результаты исследования адсорбционной способности показали, что синтезированная смола оказалась высокоселективной для серебра(I), ртути(II), золота(III) и платины(IV) в сильнокислотном водном растворе [8].

Серия высокоэффективных сорбентов благородных металлов получена золь-гель синтезом на основе кремнийорганических N,S-функциональных мономеров. Отличительной особенностью таких полимеров наряду с незаурядной комплексообразующей активностью является высокая химическая и термическая стабильность [9–11].

В целом N- и S-содержащие ионообменные и комплексообразующие сорбенты занимают лидирующие позиции среди обширной группы полимерных материалов, предложенных для извлечения ионов благородных металлов.

Цель настоящей работы — получение сополимеров ДВС с 4-ВП и изучение адсорбции благородных металлов ионами на основе синтезированных сополимеров.

Экспериментальная часть

Дивинилсульфид синтезировали по способу [1]. Непосредственно перед опытом его очищали перегонкой.

4-Винилпиридин – коммерческий продукт фирмы Sigma-Aldrich. Очистку проводили вакуумной перегонкой 58°C/5 мм рт. ст., n_D^{20} 1.5499. Чистоту мономеров контролировали хроматографически.

Динитрил азобисизомаляной кислоты (ДАК) — коммерческий продукт фирмы Sigma-Aldrich. Продукт предварительно очищали перекристаллизацией из этанола.

Радикальная сополимеризация дивинилсульфида и 4-винилпиридина. Радикальную сополимеризацию ДВС и ВП проводили ампульным методом в присутствии ДАК при 60°C. В стеклянную ампулу помещали рассчитанные количества ДВС, ВП и ДАК, реакционную смесь выдерживали в массе сомономеров в атмосфере азота при температуре 60°C в течение 4 ч. Полученный сополимер после синтеза последовательно промывали растворителями (бензолом, ацетоном и водой) в аппарате Сокслета и сушили в вакууме до постоянной массы. Составы полученных сополимеров рассчитывали по данным элементного анализа. Степень набухания сополимера ДВС–ВП определяли весовым методом.

Удельную поверхность сополимеров определяли методом низкотемпературной адсорбции–десорбции азота [12] на приборе СОРБОМЕТР-М. Суммарный объем пор W вычисляли по уравнению $W = X_{\max}/\rho$, где X_{\max} — максимальный объем сорбированного газа ($\text{г}\cdot\text{г}^{-1}$), ρ – плотность газа ($\text{г}\cdot\text{см}^{-3}$).

ИК спектры регистрировали в KBr и в вазелиновом масле на спектрометре IFS-25. УФ спектры регистрировали на приборе Specord UV-VIS.

Стандартные растворы ионов благородных металлов концентрацией 10 мг·мл⁻¹ готовили растворением препаратов H₂PtCl₆·6H₂O («чистый», ОАО AURAT), PdCl₂·2H₂O («чистый», ОАО AURAT), HAuCl₄·4H₂O (х.ч., ОАО AURAT) в соляной кислоте 3 моль·л⁻¹, Ag(NO₃)·4H₂O («чистый», ООО РЕАХИМ) растворяли в азотной кислоте 3 моль·л⁻¹.

Сорбцию благородных металлов из растворов соляной кислоты различной концентрации осуществляли в статических условиях при температуре 25°C. Для перемешивания растворов использовали аппарат для встряхивания марки 6410 М (300 качаний в 1 мин). Концентрацию ионов благородных металлов в растворах варьировали от 10⁻⁴ до 10⁻² моль·л⁻¹. Во всех случаях использовали свежеприготовленные растворы. Сорбент ДВС–ВП в статическом варианте сорбции использовали без предварительного набухания. Масса воздушно-сухого сорбента 0.02 г, объем раствора 50 мл. По окончании сорбции сополимер отделяли от раствора фильтрованием. Содержание золота в растворах после сорбции определяли атомно-абсорбционным методом на приборе С-115М1 (НПП Укрросприбор), палладия и платины — фотометрическим методом по реакции образования их хлороловянных комплексов [13]. Измерение оптической плотности проводили на электрофотокориметре КФК-3-1.

Эффективность процесса извлечения ионов металлов из раствора оценивали по степени извлечения W (%), которую рассчитывали как отношение раз-

ности исходной $c_{\text{исх}}$ ($\text{мг}\cdot\text{л}^{-1}$) и конечной $c_{\text{кон}}$ ($\text{мг}\cdot\text{л}^{-1}$) концентраций ионов металла в растворе к исходной концентрации ионов металла:

$$W = \frac{(c_{\text{исх}} - c_{\text{кон}})}{c_{\text{исх}}} \cdot 100\%.$$

Статическую сорбционную емкость A ($\text{мг}\cdot\text{г}^{-1}$) рассчитывали по формуле

$$A = \frac{c_0 - c}{m} V,$$

где c_0 и c — исходная и равновесная концентрации иона металла в растворе ($\text{мг}\cdot\text{л}^{-1}$), V — объем раствора (л), m — масса сорбента (г).

Аналогично исследовали сорбцию ионов серебра из растворов азотной кислоты. Остаточную концентрацию серебра в растворах определяли атомно-абсорбционным методом на приборе С-115М1.

При проведении сорбции Pt(IV), Pd(II), Au(III) из растворов серной кислоты исходные хлоридные растворы благородных металлов смешивали с водными растворами серной кислоты необходимой концентрации. Процесс сорбции и анализ растворов осуществляли аналогично исследованию в солянокислых растворах.

Обсуждение результатов

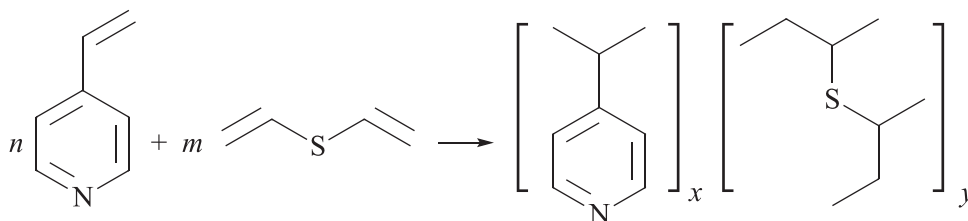
Радикальной сополимеризацией ДВС с ВП получены нерастворимые сополимеры, которые представляют собой порошки желтого цвета и обладают высокой механической прочностью и осмотической стабильностью, устойчивы к действию солей, разбавленных кислот и щелочей (кипячение образцов в течение 6 ч в 10%-ных растворах соляной, серной,

азотной кислот и гидроксида натрия не вызывает деформацию каркаса). Сополимеры хорошо набухают в органических растворителях: в ацетоне — на 500%, в гексане на — 300%. Набухаемость сополимеров в водном растворе кислоты и щелочи значительно ниже и составляет до 100 и 60% соответственно. Варьируя количество ДВС в сополимере, можно целенаправленно увеличивать степень сшивки, что приводит к понижению степени набухания, и появляется возможность использования сополимеров в колоночных процессах извлечения ионов благородных металлов. Удельная поверхность по азоту $2.3 \text{ м}^2\cdot\text{г}^{-1}$, суммарный объем пор $0.22 \text{ см}^3\cdot\text{г}^{-1}$ полученных сополимеров сопоставимы с аналогичными показателями известных сополимеров схожей структуры [14, 15].

Процесс сополимеризации протекает с хорошим выходом при любых соотношениях мономерной смеси (табл. 1). Составы сополимеров, рассчитанные по содержанию азота и серы, удовлетворительно согласуются между собой. Количество звеньев ДВС в сополимере уменьшается с понижением его концентрации в исходной смеси. С увеличением содержания ДВС в исходной смеси наблюдается уменьшение выхода целевого продукта.

В ИК спектрах сополимеров отсутствуют полосы поглощения, характерные для виниловой группы при $960, 1580$ и 1640 см^{-1} , но остаются неизменными полосы поглощения пиридинового кольца ($1600, 1555, 1490, 1068 \text{ см}^{-1}$). Полоса поглощения при 660 см^{-1} может быть отнесена к валентным колебаниям связи С–S.

Образование нерастворимого продукта и данные ИК спектроскопии свидетельствуют о том, что сополимеризация ДВС с ВП протекает с раскрытием двух двойных связей в ДВС, что приводит к образованию сополимера, имеющего сетчатую структуру:



Предварительными экспериментами было показано, что сополимер ДВС–ВП, содержащий 8.78% азота и 12.67% серы (табл. 1, опыт № 3), обладает более высокой сорбционной активностью. Поэтому детальное исследование сорбционных свойств осуществлено для этого образца сополимера.

Изучение адсорбции ионов серебра рассматриваемым сополимером ДВС–ВП осуществлено в растворах азотной кислоты, где этот металл присутствует

в виде катиона Ag^+ . Извлечение ионов Pt, Pd и Au исследовано в растворах соляной и серной кислот, в которых эти металлы существуют в виде ацидокомплексов различного состава [5, 16–18].

Для ацидокомплексов Pt, Pd, Au с увеличением концентрации кислот отмечается некоторое снижение степени извлечения ионов металлов, за исключением тетрагидрохлоридного комплекса золота в сернокислой среде (рис. 1). В большей степени снижение степени из-

Таблица 1

Сополимеризация дивинилсульфида с 4-винилпиридином (ДАК = 0.5 мас% , 60°C, 6 ч)

№ опыта	Состав исходной смеси, мол%		Содержание азота и серы, мас%		Состав сополимера, мол%		Выход, %
	ВП	ДВС	N	S	ВП	ДВС	
1	20.0	80.0	5.01	23.42	32.11	67.89	65
2	40.1	59.9	7.90	16.83	54.36	45.64	75
3	50.0	50.0	8.78	12.67	61.23	38.77	92
4	80.0	20.0	12.11	3.45	88.75	11.25	80

влечения ионов металлов проявляется для хлорокомплексов платины и золота в растворе соляной кислоты (рис. 1). Приведенный характер зависимости свидетельствует в пользу анионного обмена по пиридиновому атому азота и проявления конкурирующего влияния анионов кислоты с учетом их размеров и подвижности. Не исключается и координационное взаимодействие ионов металлов по атомам азота и серы, что в большей степени характерно для катионной формы серебра.

Время установления сорбционного равновесия при извлечении металлов из 1 М растворов кислот составляет 60 мин для катиона серебра при времени полусорбции $\tau_{1/2} = 15$ мин; для анионных ком-

плексов Pt, Pd $\tau_{1/2} = 30$ мин для хлорокомплексов Au $\tau_{1/2} = 5-10$ мин.

Изотермы адсорбции в 1 М растворах кислот (рис. 2) характеризуют распределение ионов металлов в жидкой и твердой фазах в состоянии равновесия и позволяют рассчитать значения сорбционной емкости (табл. 2).

В целом сополимеры ДВС-ВП характеризуются высокими значениями статических сорбционных емкостей, которые для Au(III), Ag(I), Pt(IV) и Pd(II) достигают 1200, 340, 1040, 520 мг·г⁻¹ соответственно.

Высокая сорбционная активность рассматриваемых сополимеров (табл. 2) определяется достаточно

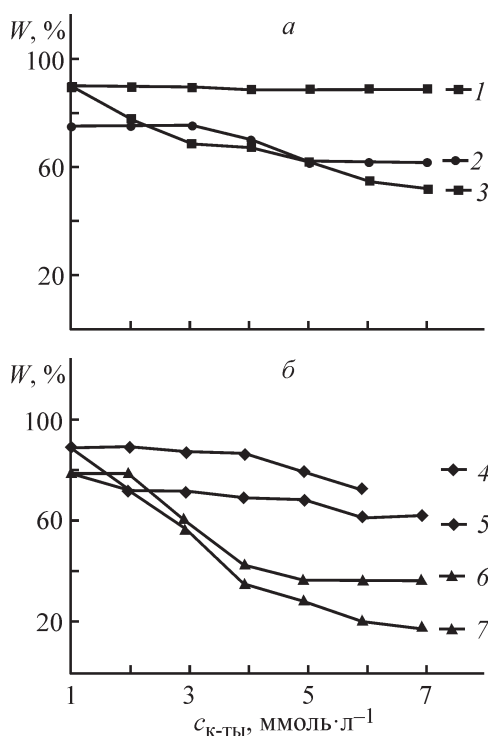


Рис. 1. Влияние природы и концентрации кислот на степень извлечения ионов Au(III) в H₂SO₄ (1) и HCl (3), Ag(I) в HNO₃ (2), Pd(II) в H₂SO₄ (4) и HCl (5), Pt(IV) в H₂SO₄ (6) и HCl (7).

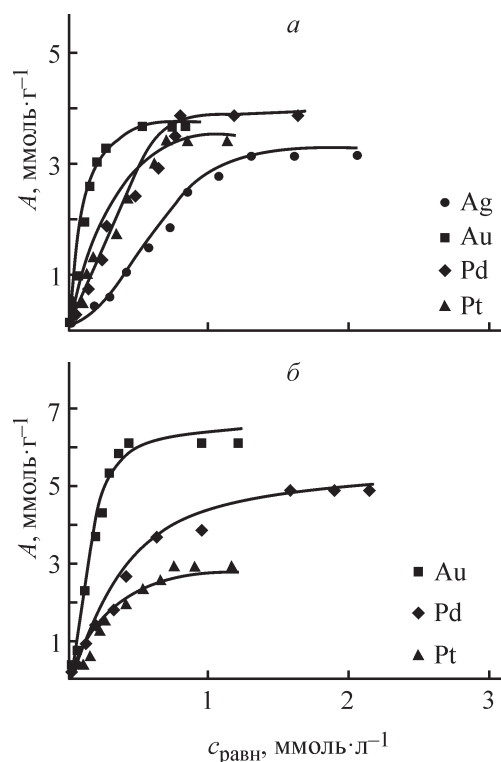


Рис. 2. Изотермы адсорбции ионов Ag в HNO₃ 1 М (а), Au, Pt, Pd в HCl 1 М (а) и H₂SO₄ 1 М (б) ($m_{\text{сорб}} = 10$ мг, $V = 20$ мл, $t = 2$ ч).

высоким содержанием атомов азота и серы в составе сополимера (табл. 1, опыт № 3). В соответствии с удельным содержанием азота и серы в составе сополимера рассчитаны теоретические значения полной сорбционной емкости по благородным металлам исходя из предположения о взаимодействии ионов благородных металлов с атомами азота и серы в соотношении 1:1 (табл. 3). Сопоставление экспериментальных (табл. 2) и теоретически достижимых (табл. 3) значений сорбционной емкости сополимера ДВС–ВП по ионам благородных металлов свидетельствует о высокой степени заполнения химически активных центров на поверхности адсорбента.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что исследованные сополимеры ДВС и 4-ВП не уступают по эффективности сорбционного извлечения благородных металлов известным комплексообразующим и ионообменным сорбентам, содержащим в своем составе сходные химически активные группы, в том числе гетероциклические амины [19–21].

Для выяснения механизма сорбционного взаимодействия изучены ИК спектры исходных сополимеров и сополимеров, обработанных минеральными кислотами, и их концентратов после сорбции. В ИК спектре сополимера, обработанного соляной кислотой 1 М, появляется широкая полоса поглощения в области 2600–3000 см⁻¹, характерная для аммониевого катиона. Смещение полосы поглощения с 1600 к 1630 см⁻¹ также свидетельствует об образовании протонированного атома азота в пиридиновом фрагменте сополимера. Такие же изменения сохраняются и в ИК спектрах сополимера, насыщенного ионами благородных металлов. Полученные данные позволяют предполагать, что для ацидокомплексов Pt, Pd, Au сорбция происходит за счет ионного обмена с последующим вытеснением лигандов из внутренней сферы хлорокомплекса металла.

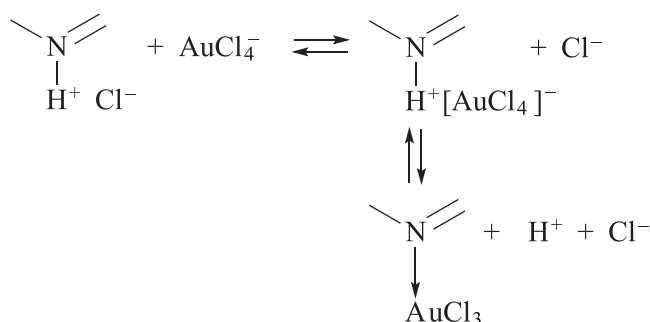
По аналогии с литературными данными по извлечению ионов переходных, в том числе благородных, металлов сорбентами со сходными функциональными группами [22–25] можно предположить, что при сорбции металлов, находящихся в растворе в виде

Таблица 2

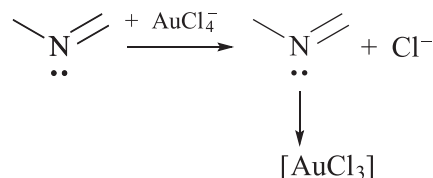
Значения статической сорбционной емкости A в растворах кислот 1 моль·л⁻¹

Металл	A , мг·г ⁻¹ /ммоль·г ⁻¹	
	HCl	H ₂ SO ₄
Pt	670/3.44	570/2.92
Pd	410/3.88	520/4.91
Au	730/3.71	1200/6.09
Ag	330/3.06 (HNO ₃)	

ацидокомплексов, вначале имеет место анионный обмен, а затем происходит координация. Таким образом, взаимодействие по атому азота можно представить следующей схемой: по протонированной форме соединения сорбция проходит вначале по ионному механизму, а затем происходит вытеснение хлорид-иона из первой координационной сферы металла:



Сорбция на непротонированной форме происходит только в результате замещения хлорид-ионов лигандными группами комплекса:



Смещение полосы поглощения ДВС-фрагмента в полимерной матрице с 660 до 700 см⁻¹ свидетельствует

Таблица 3

Теоретические значения полной сорбционной емкости сополимера ДВС–ВП

Удельное содержание, ммоль·г ⁻¹		Полная сорбционная емкость, мг·г ⁻¹							
		вычислено по удельному содержанию азота в сорбенте				вычислено по удельному содержанию серы в сорбенте			
N	S	Ag(I)	Au(III)	Pt(IV)	Pd(II)	Ag(I)	Au(III)	Pt(IV)	Pd(II)
6.27	3.96	677	1236	1223	665	428	780	772	420

ет об участии атомов серы сополимера в процессах сорбции металлов.

Установлено, что в условиях извлечения благородных металлов в 1 М растворах кислот не сорбируются железо, кобальт, никель, цинк. При исходной концентрации 1 мг·мл⁻¹ медь извлекается на 18%.

Выводы

1. Радикальной сополимеризацией дивинилсульфида с 4-винилпиридином в присутствии динитрила азобисизомасляной кислоты с выходом до 92% получены сетчатые сополимеры, имеющие удельную поверхность по азоту 2.3 м²·г⁻¹, суммарный объем пор 0.22 см³·г⁻¹.

2. Сополимеры дивинилсульфид-4-винилпиридин характеризуются высокими значениями статических сорбционных емкостей, которые для Au(III), Ag(I), Pt(IV) и Pd(II) достигают 1200, 340, 1040, 520 мг·г⁻¹ соответственно.

3. Взаимодействие ионов благородных металлов с поверхностью адсорбента является результатом образования ионно-координированных комплексов с атомами азота и серы химически активных групп сополимера.

Приведенные в статье результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 4.5867.2017/8.9 и гранта РФФИ № 16-08-00198а.

Список литературы

- [1] Pat. GB 1369280 (publ. 1974). Divinyl sulfide. С. А. 1975. V. 83. 27563.
- [2] Vitkovskaya N., Kobychyev V., Skitnevskaya A., Orel V., Bobkov A., Zubarev A., Trofimov B. // *Tetrahedron Lett.* 2017. V. 58. N 1. P. 92–96.
- [3] Трофимов Б. А., Амосова С. В. Дивинилсульфид и его производные. Новосибирск: Наука, 1983. 264 с.
- [4] Салдадзе К. М., Копылова-Валова В. Д. Комплексообразующие иониты. М.: Химия, 1980. 336 с.
- [5] Massey A. G., Thompson N. R., Johnson B. F. G. *The Chemistry of Copper, Silver and Gold.* Oxford; New York: Pergamon Press, 1973. 197 p.
- [6] Piłśniak-Rabiega M., Trochimczuk A. W. // *Hydrometallurgy.* 2014. V. 146. P. 111–118.
- [7] Talanova G. G., Zhong, L., Kravchenko O. V., Yatsimirskii K. B., Bartsch R. A. // *J. Appl. Polym. Sci.* 2011. V. 80. N 2. P. 207–213.
- [8] Liu C. Y., Lih J. J. Z. // *Fresenius' Zeitschrift für analytische Chemie.* 1988. Bd 332. N 2. S. 171–175.
- [9] Власова Н. Н., Пожидяев Ю. Н., Распопина О. Ю., Белоусова Л. И., Вороноков М. Г. // *ЖОХ.* 1999. Т. 69. № 9. С. 1446–1449 [Vlasova N. N., Pozhidaev Yu. N., Raspopina O. Yu., Belousova L. I., Voronkov M. G. // *Russ. J. Gen. Chem.* 1999. V. 69. N 9. P. 1391–1394].
- [10] Pozhidaev Y., Vlasova N., Voronkov M., Vasilyeva I. // *Advanced Sci. Lett.* 2013. V. 19. N 2. P. 615–618.
- [11] Пожидяев Ю. Н., Оборина Е. Н., Белоусова Л. И., Власова Н. Н., Воронков М. Г. // *ДАН.* 2004. Т. 399. Вып. 6. С. 788–790 [Pozhidaev Yu. N., Oborina E. N., Belousova L. I., Vlasova N. N., Voronkov M. G. // *Doklady Chem.* 2004. V. 399. N 4–6. P. 250–252].
- [12] Rouquerol F., Rouquerol J., Llewellyn P., Maurin G., Sing K. *Adsorption by Powders and Porous Solids.* Oxford; Amsterdam: Acad. Press, 2013. 646 p.
- [13] Марченко З., Бальцезжак М. К. Методы спектрофотометрии в УФ и видимой областях в неорганическом анализе: Пер. с польск. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. 711 с.
- [14] Светлов А. К., Раховская С. М., Хомутов Л. И., Боримская В. С. // *Коллоид. журн.* 1971. Т. 33. С. 264–267.
- [15] Вокина О. Г., Царик Л. Я., Калабина А. В., Кузаяев А. И. // *Высокомолекуляр. соединения.* 1982. Т. 24А. № 7. С. 1378–1385 [Vokina O. G., Tsarik L. Ya., Kalabina A. V., Kuzayev A. I. // *Polym. Sci.* 1982. V. 24. N 7. P. 1742–1748].
- [16] Livingstone S. E. *The Chemistry of Ruthenium, Rhodium, Palladium, Osmium, Iridium and Platinum.* Oxford; New York: Pergamon Press, 1973. 224 p.
- [17] Симонова С. А., Бурмистрова Н. М., Афонин М. В. // *Рос. хим. журн.* 2006. Т. L. № 4. С. 19–25.
- [18] Адеева Л. Н., Миронов А. В. // *Вестн. Омского ун-та.* 2013. № 4. С. 128–131.
- [19] Мясоедова Г. В., Захарченко Е. А., Моходоева О. Б., Кубракова И. В., Никашина В. А. // *ЖАХ.* 2005. Т. 60. № 5. С. 536–542.
- [20] Симонова С. А., Бурмистрова Н. М., Бажанова И. С., Тевлина А. С., Коновалов Л. В. // *ЖПХ.* 1998. Т. 71. № 4. С. 573–579 [Simanova S. A., Burmistrova N. M., Bazhanova I. S., Tevlina A. S., Kononov L. V. // *Russ. J. Appl. Chem.* 1998. V. 71. N 4. P. 588–594].
- [21] Моходоева О. Б., Мясоедова Г. В., Кубракова И. В. // *ЖАХ.* 2007. Т. 62. № 7. С. 679–695 [Mokhodoeva O. B., Myasoedova G. V., Kubrakova I. V. // *J. Analyt. Chem.* 2007. V. 62. N 7. P. 607–622].
- [22] Ehrlich H. V., Buslaeva T. M., Maryutina T. A. // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2017. V. 62. N 14. P. 1797–1818.
- [23] Борягина И. В., Волчкова Е. В., Буслаева Т. М., Васильева М. В., Эрлих Г. В. // *Цв. металлы.* 2012. № 5. С. 59–64.
- [24] Boryagina I. V., Volchkova E. V., Buslaeva T. M., Lobanova U. A., Ehrlich H. V. // *Precious Metals.* V. 33. N 1. P. 45–47.
- [25] Эрлих Г. В., Лисичкин Г. В. // *ЖОХ.* 2017. Т. 87. № 6. С. 1001–1027 [Ehrlich H. V., Lisichkin G. V. // *Russ. J. Gen. Chem.* 2017. V. 87. N 6. P. 1220–1245].