

УДК 544.723:543.33

КОНЦЕНТРИРОВАНИЕ ИОНОВ ЦИНКА, КАДМИЯ И РТУТИ(II) ПОЛИМЕРНЫМ МОДИФИЦИРОВАННЫМ СОРБЕНТОМ НА ОСНОВЕ ВЫСОКООСНОВНОГО АНИОНИТА АРА-8П И ПРОИЗВОДНОГО РОДАНИНА

© 2023 г. С. М. Увайсова^а, *, М. А. Бабуев^б, У. М. Дамыров^б

^аДагестанский федеральный исследовательский центр Российской академии наук
ул. М. Гаджиева, 45, Махачкала, 367032 Россия

^бДагестанский государственный университет
ул. М. Гаджиева, 43-а, Махачкала, 367032 Россия

*e-mail: smuvaisova@mail.ru

Поступила в редакцию 25.10.2022 г.

После доработки 02.12.2022 г.

Принята к публикации 05.12.2022 г.

Изучены условия сорбции ионов цинка, кадмия и ртути(II) модифицированным сорбентом на основе высокоосновного анионита АРА-8п и производного роданина 5-(4-карбоксифенил-азо)роданин (АРА-8п-п-КБАР) в статическом режиме. Определены значения pH, времени контакта фаз, концентрация сорбата, при которых достигается максимальное извлечение ионов цинка, кадмия и ртути(II). По полученным изотермам сорбции определены значения сорбционной емкости сорбента по сорбируемым ионам. Рассчитанное значение свободной энергии показывает, что сорбция протекает с образованием связи типа ионной. Подобраны элюенты, обеспечивающие количественную десорбцию ионов цинка, кадмия и ртути(II). Изучено мешающее влияние макро- и микрокомпонентов вод и показано, что данным сорбентом ионы цинка, кадмия и ртути(II) количественно сорбируются из раствора сложного фонового состава. Разработана методика сорбционно-атомно-абсорбционного определения ионов цинка, кадмия и ртути(II) в различных водах.

Ключевые слова: сорбция, модифицированный сорбент, цинк, кадмий, ртуть, вода.

DOI: 10.31857/S004445022305016X, EDN: MIXWPA

Тяжелые металлы (ТМ) входят в перечень загрязняющих веществ окружающей среды. Большое количество ТМ сбрасывается в водоемы в связи с бурным развитием индустрии. Некоторые ТМ участвуют в процессах жизнедеятельности человеческого организма, но их большие количества представляют угрозу и увеличивают риск развития различных отклонений жизненно важных органов. Таким образом, мониторинг и очистка природных объектов от ТМ является важным и актуальным вопросам экологии [1].

Сорбционные методы как методы извлечения и концентрирования находят широкое применение. В качестве сорбентов преимущественно используются природные материалы [2–6], наноматериалы [7–9], синтезированные [10] и модифицированные [11–13] сорбенты. Наиболее перспективными являются сорбционные методы с применением полимерных хелатообразующих сорбентов, которые позволяют осуществлять индивидуальное или групповое выделение микро-

элементов из больших объемов растворов сложного состава и снижать их пределы обнаружения.

Для извлечения ионов цинка, кадмия и ртути(II) эффективны хелатообразующие лиганды, содержащие атомы серы, кислорода и азота [5, 13]. Азороданины содержат перечисленные выше атомы и способны образовывать устойчивые комплексы с ионами ТМ [14].

У ранее известных сорбентов имеются определенные недостатки: низкие значения сорбционной емкости [15–19], длительный процесс сорбции (более 60 мин) по сравнению с предложенным нами сорбентом [20–22].

Цель работы – исследование условий сорбции ионов цинка, кадмия и ртути(II) модифицированным сорбентом на основе высокоосновного анионита АРА-8п и 5-(4-карбоксифенил-азо)роданина с последующим их определением в объектах окружающей среды.

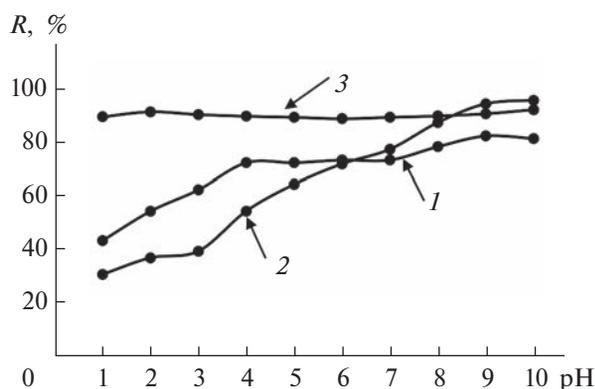


Рис. 1. Зависимости степени извлечения ионов цинка (1), кадмия (2) и ртути(II) (3) сорбентом АРА-8п-п-КБАР от рН при $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ($m_c = 0.02\text{--}0.05$ г, $V = 25$ мл, $c_{\text{Zn}} = 8 \times 10^{-3}$ мг/мл, $c_{\text{Cd}} = 8 \times 10^{-3}$ мг/мл, $c_{\text{Hg}} = 0.2$ мг/мл).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Растворы и реагенты. Исходные растворы ТМ с концентрацией 1 мг/мл готовили следующим образом: цинк — растворяли точную навеску спектрально чистого цинка в соляной кислоте х. ч.; кадмий — растворяли точную навеску $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ х. ч. в дистиллированной воде; ртуть(II) — растворяли точную навеску $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ х. ч. в дистиллированной воде с добавлением 6 М азотной кислоты по методике [23]. Рабочие растворы готовили разбавлением исходных растворов дистиллированной водой в день использования.

Для построения градуировочной зависимости для определения концентрации цинка использовали ГСО 7837-2000, кадмия — ГСО 7472-98, ртути(II) — ГСО 7879-2001.

Растворы, содержащие ионы K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} , Sr^{2+} , Al^{3+} , Fe^{3+} с концентрацией 1 мг/мл готовили из их солей квалификации х. ч. по прописям, приведенным в работе [23], и подкисляли с учетом гидролитических свойств ионов [24]. Рабочие растворы готовили последовательным разбавлением исходных. Для создания в исследуемых системах определенного значения рН использовали 0.1 М растворы HCl , HNO_3 и NaOH .

В качестве сорбционного материала использовали модифицированный полимерный сорбент на основе высокоосновного анионита АРА-8п (Cl^- — форма) и 5-(4-карбоксифенил-азо)роданина. Методика получения сорбента и его идентификация описаны в работе [25].

Аппаратура. Значения рН исследуемых растворов контролировали универсальным иономером рН-150МИ. Массу веществ измеряли на аналитических весах НТР-220СЕ. Контакт фаз осуществляли на перемешивающем устройстве

LS 220. Содержание ионов цинка, кадмия и ртути(II) в анализируемых растворах определяли вольтамперометрическим методом на полярографе с электрохимическим датчиком “Модуль ЕМ-04” (Вольта, Санкт-Петербург). При разработке методики остаточные концентрации ионов цинка, кадмия и ртути(II) определяли на атомно-абсорбционном спектрометре ContrAA 700R (Analytik Jena AG, Германия).

Методика эксперимента. Сорбцию изучали в статических условиях. Условия ($\text{pH}_{\text{опт}}$, время сорбции, концентрация металла в растворе), при которых наблюдается максимальная сорбция ионов металлов, определяли по зависимости степени их извлечения (R , %) от изучаемого параметра. В бюксы емк. 100 мл вносили 0.02–0.05 г сорбента и 25 мл раствора металла определенной концентрации, доводили рН до необходимого значения и перемешивали на перемешивающем устройстве [26]. Растворы фильтровали и определяли равновесные концентрации вольтамперометрическим методом. Для исключения осаждения цинка и кадмия в виде $\text{Zn}(\text{OH})_2$ и $\text{Cd}(\text{OH})_2$ сорбент после адсорбции промывали подкисленной до рН 3.0 дистиллированной водой. Сорбционную емкость сорбента (SEC_{Me}) устанавливали по изотермам сорбции.

Для изучения мешающего влияния макро- и микрокомпонентов ряда природных объектов проводили сорбцию с постоянной концентрацией исследуемых ионов металлов и переменным кратным массовым избытком сопутствующих элементов (1 : 1, 1 : 10, 1 : 50, 1 : 100, 1 : 500, 1 : 1000). Исследования проводили в условиях максимальной сорбции изучаемого иона. После концентрирования рассчитывали степень извлечения ионов изучаемых металлов.

Десорбцию осуществляли путем перемешивания сорбента, содержащего сорбированные ионы элементов, растворами разных кислот различной концентрации.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние кислотности среды изучали в интервале значений рН 1.0–10.0 (рис. 1). Максимальная сорбция ионов цинка и кадмия АРА-8п-п-КБАР наблюдается при рН 9.0–10.0. Дальнейшие исследования сорбции этих ионов проводили при рН 9.0.

Как видно из рис. 1, степень извлечения ионов ртути(II) практически не зависит от рН. С учетом того, что вольтамперометрическое определение ионов ртути(II) проводят в сильноокислой среде, в дальнейших исследованиях сорбции ртути(II) использовали рН 2.0.

Влияние времени. Исследование кинетики сорбции металлов показало (рис. 2), что для изу-

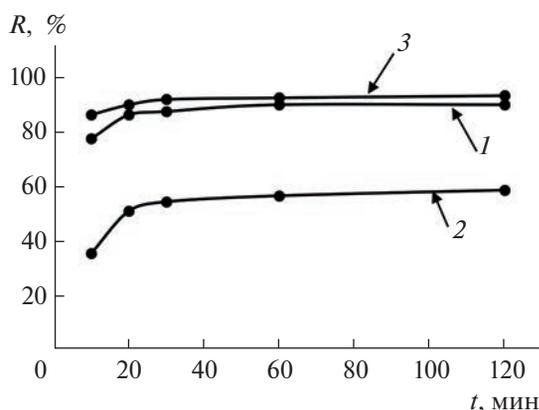


Рис. 2. Зависимости степени извлечения ионов цинка (1), кадмия (2) и ртути(II) (3) сорбентом АРА-8п-п-КБАР от времени контакта фаз при pH_{Zn} 9.0, pH_{Cd} 9.0, pH_{Hg} 2.0 и $20 \pm 2^\circ C$ ($m_c = 0.02-0.05$ г, $V = 25$ мл, $c_{Zn} = 8 \times 10^{-3}$ мг/мл, $c_{Cd} = 8 \times 10^{-3}$ мг/мл, $c_{Hg} = 0.2$ мг/мл).

чаемых сорбентов характерна сравнительно высокая скорость сорбции. Для достижения максимальной степени извлечения исследуемых ионов металлов достаточно 30 мин контакта сорбата с сорбентом.

Влияние концентрации ионов металлов на сорбцию. С увеличением концентрации ионов металлов в растворе увеличивается и количество адсорбированного сорбентом металла. Как видно из рис. 3, при концентрации ионов цинка в растворе 0.5 мг/мл оно становится максимальным и составляет 171 мг/г, при концентрации ионов кадмия 0.4 мг/мл – 99.7 мг/г и при концентрации ионов ртути(II) 0.6 мг/мл – 593 мг/г.

Механизм процесса сорбции. Равновесие в адсорбционной системе зависит от природы взаимодействия адсорбент–адсорбат. Данные обработки изотерм равновесной адсорбции необходимы для понимания механизма взаимодействия исследуемых металлов с адсорбентами. Исходя из начальной формы изотерм сорбции ионов цинка и кадмия (рис. 3), их можно отнести по классификации ИЮПАК к IV типу. Для данного типа характерен выпуклый начальный участок, указывающий на сильное взаимодействие между адсорбатом и адсорбентом.

Изотерма сорбции ионов ртути(II) (рис. 3) по классификации ИЮПАК соответствует I типу, характеризующему адсорбцию на микропористых материалах. Этот тип изотерм имеет вид кривой с насыщением, схожей по виду с изотермой Ленгмюра: изотерма выпукла относительно оси абсцисс, образуется мономолекулярный слой адсорбата, и все активные центры обладают равной энергией.

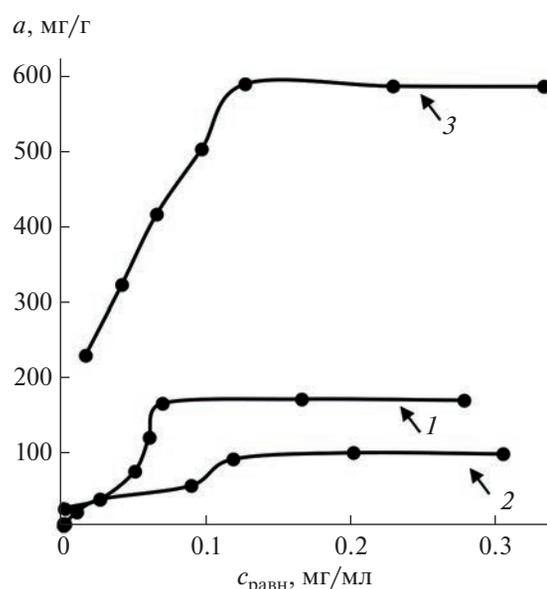


Рис. 3. Изотермы сорбции ионов цинка (1), кадмия (2) и ртути(II) (3) на сорбенте АРА-8п-п-КБАР (pH_{Zn} 9.0, pH_{Cd} 9.0, pH_{Hg} 2.0, $\tau = 30$ мин, $20 \pm 2^\circ C$, $m_c = 0.02-0.05$ г, $V = 25$ мл).

Для выявления вероятного механизма процесса сорбции экспериментальные данные обрабатывали с применением моделей изотерм Ленгмюра [27], Фрейндлиха [28] и Темкина [29], которые имеют следующие линейные формы:

$$\frac{c_{\text{равн}}}{a} \frac{1}{a_{\text{max}} K_L} + \frac{1}{a_{\text{max}}} c_{\text{равн}}, \quad (1)$$

где K_L – константа адсорбционного равновесия уравнения Ленгмюра;

$$\lg a = \lg K_F + \frac{1}{n} \lg c_{\text{равн}}, \quad (2)$$

где n и K_F – константы уравнения Фрейндлиха;

$$a = \frac{1}{\alpha} \ln K_T + \frac{1}{\alpha} \ln c_{\text{равн}}, \quad (3)$$

где K_T и α – константы уравнения Темкина.

Для расчета констант уравнений Ленгмюра, Фрейндлиха и Темкина построили графические зависимости $\frac{c_{\text{равн}}}{a} - c_{\text{равн}}$, $\lg a - \lg c_{\text{равн}}$ и $a - \ln c_{\text{равн}}$

для каждой изотермы, коэффициенты детерминации приведены в табл. 1.

По адекватности описания процесса адсорбции ионов цинка, кадмия и ртути(II) рассмотрен-

Таблица 1. Параметры моделей изотерм адсорбции ионов цинка, кадмия и ртути(II) на сорбенте АРА-8п-п-КБАР

Модель адсорбции	Параметр модели	Zn ²⁺	Cd ²⁺	Hg ²⁺
Ленгмюра	K_L , л/ммоль	3.05	2.0	9.38
	a_{max} , ммоль/г	2.86	1.06	3.08
	R^2	0.988	0.962	0.997
Фрейндлиха	n	1.36	1.47	2.56
	K_F , (ммоль/г)(л/ммоль) ^{1/n}	1.78	0.64	3.17
	R^2	0.843	0.966	0.957
Темкина	α	0.98	3.94	0.51
	K_T , л/ммоль	6.22	7.01	5.03
	R^2	0.822	0.965	0.953

ные модели можно расположить в следующих порядках (слева направо). Для Zn²⁺:

Модель адсорбции	Ленгмюра	Фрейндлиха	Темкина
R^2	0.988	0.843	0.822

Для Cd²⁺:

Модель адсорбции	Фрейндлиха	Темкина	Ленгмюра
R^2	0.966	0.965	0.962

Для Hg²⁺:

Модель адсорбции	Ленгмюра	Фрейндлиха	Темкина
R^2	0.997	0.957	0.953

Видно, что для описания изотермы адсорбции ионов цинка и ртути(II) предпочтительна модель Ленгмюра. Для описания изотермы адсорбции ионов кадмия подходят все модели. Однако значение константы Фрейндлиха с $n > 1$ указывает на то, что равновесные данные сорбции более соответствуют изотерме Фрейндлиха [6].

Таблица 2. Параметры модели Дубинина–Радушкевича изотерм адсорбции ионов цинка, кадмия и ртути(II) на сорбенте АРА-8п-п-КБАР

Параметр модели	Zn ²⁺	Cd ²⁺	Hg ²⁺
K , моль ² /кДж ²	-0.0074	-0.0066	-0.0035
a_{max} , ммоль/г	11.34	4.36	7.62
E , кДж/моль	8.22	8.70	11.95
R^2	0.972	0.986	0.962

Для получения данных о природе образующихся связей между сорбируемым ионом и сорбентом равновесные данные обработали с помощью модели изотермы Дубинина – Радушкевича. Модель Дубинина–Радушкевича применима для расчета средней свободной энергии адсорбции (E) по уравнению $E = (-2K)^{-0.5}$, которая указывает на природу адсорбции адсорбата на адсорбенте. Результаты приведены в табл. 2.

Рассчитанные значения $E_{Zn} = 8.22$ кДж/моль, $E_{Cd} = 8.70$ кДж/моль и $E_{Hg} = 11.95$ кДж/моль указывают на то, что адсорбция ионов цинка, кадмия и ртути(II) сорбентом АРА-8п-п-КБАР протекает с образованием устойчивых химических связей, идентичных по энергии с ионными связями [30].

Матричное влияние. Избирательность полимерных хелатообразующих сорбентов по отношению к отдельным ионам металлов обусловлена свойствами функциональных групп и проявляется в определенных условиях. Исследовали степень сорбции ионов цинка, кадмия и ртути(II) в присутствии макро- и микрокомпонентов вод. Установили, что в выбранных условиях концентрирования ионов цинка, кадмия и ртути(II) присутствие в растворе кратных массовых количеств сопутствующих элементов (табл. 3) не влияет на степень их извлечения. Это указывает на то, что модифицированный сорбент обладает достаточно высокой избирательностью к ионам сорбируемых металлов в фоновом растворе сложного состава.

Десорбция ионов цинка, кадмия и ртути(II) с сорбента АРА-8п-п-КБАР. Возможность количественной десорбции ионов позволяет быстро извлекать сорбируемые ионы раствором минеральной кислоты, а в случае полимерных сорбентов – многократно использовать его после регенерации. Экспериментально установили, что количественная десорбция ионов цинка и кадмия

с сорбента АРА-8п-п-КБАР достигается промыванием концентрата 10 мл 4 М НСl, а ионы ртути(II) количественно десорбируются 10 мл 3 М HNO₃. Установили также, что 4 М НСl и 3 М HNO₃ не разрушают изучаемые сорбенты и не десорбируют модификатор.

Таким образом, показана перспективность использования модифицированного сорбента АРА-8п-п-КБАР для концентрирования микроколичеств цинка, кадмия и ртути(II). Разработанную методику применили для концентрирования и атомно-абсорбционного определения микроколичеств цинка, кадмия и ртути(II) в водопроводной воде (г. Махачкала) и в воде реки Сулак (водозабор на г. Махачкалу).

Методика определения. К 1 л отфильтрованной от механических примесей анализируемой воды добавляли 6 мл разбавленной (1 : 1) H₂SO₄ и 1.0 г (NH₄)₂S₂O₈ для разрушения комплексов цинка, кадмия и ртути(II) с органическими примесями, содержащимися в воде. Пробу кипятили 10–15 мин и давали ей отстояться в течение 1 ч. Избыток кислоты нейтрализовали добавлением 10%-ного раствора аммиака до рН 2.0–2.5. Создавали оптимальные значения рН: для концентрирования ионов цинка и кадмия рН 9.0, ионов ртути(II) – рН 2.0. Затем вносили 0.1 г сорбента в колонку со

Таблица 3. Допустимые кратные массовые количества мешающих ионов при сорбции ионов цинка, кадмия и ртути(II) на сорбенте АРА-8п-п-КБАР

Мешающий ион (M ⁿ⁺)	Массовое соотношение		
	[Zn ²⁺] : [M]	[Cd ²⁺] : [M]	[Hg ²⁺] : [M]
Na ⁺	1 : 1000	1 : 1000	1 : 1000
K ⁺	1 : 1000	1 : 1000	1 : 1000
Ca ²⁺	1 : 500	1 : 1000	1 : 1000
Ba ²⁺	1 : 1000	1 : 1000	1 : 1000
Mg ²⁺	1 : 500	1 : 750	1 : 1000
Sr ²⁺	1 : 1000	1 : 1000	1 : 1000
Fe ³⁺	1 : 750	1 : 750	1 : 10
Al ³⁺	1 : 750	1 : 750	1 : 500

стекловатой и пропускали анализируемую воду со скоростью 10 мл/мин. Колонку промывали бидистиллированной водой и десорбировали ионы цинка и кадмия 10 мл 4 М НСl, ртути(II) – 25 мл 3 М HNO₃. Элюент пропускали со скоростью 0.5 мл/мин. Содержание определяемых компонентов контролировали методом атомно-абсорбционной спектроскопии при оптимальных усло-

Таблица 4. Результаты сорбционно-атомно-абсорбционного определения цинка, кадмия и ртути(II) в водопроводной воде г. Махачкалы и в воде реки Сулак (водозабор на г. Махачкалу) (*n* = 5, *P* = 0.95)

Определяемый элемент	Введено, мкг/л	Найдено, мкг/л	<i>s_r</i>
Водопроводная вода г. Махачкала			
Zn	0	3.6 ± 0.3	0.069
	10.0	13.6 ± 0.96	0.051
	20.0	23.8 ± 1.9	0.065
Cd	0	0	
	10.0	10.0 ± 0.8	0.062
	20.0	21.3 ± 1.9	0.072
Hg	0	0	
	0.075	0.075 ± 0.019	0.208
	0.150	0.17 ± 0.03	0.142
Вода реки Сулак (водозабор на г. Махачкалу)			
Zn	0	7.9 ± 0.7	0.075
	10.0	17.1 ± 1.4	0.065
	20.0	26.4 ± 2.3	0.069
Cd	0	0	
	10.0	11.3 ± 0.4	0.028
	20.0	22.9 ± 0.3	0.012
Hg	0	0	
	0.075	0.075 ± 0.021	0.226
	0.150	0.15 ± 0.02	0.094

виях анализа рассматриваемых элементов. Результаты представлены в табл. 4. Как видно, разработанная методика сорбционно-атомно-абсорбционного определения ионов цинка, кадмия и ртути(II) характеризуется хорошей воспроизводимостью. Предел обнаружения ионов цинка и кадмия составляет $n \times 10^{-3}$ мг/л, ртути(II) – $n \times 10^{-5}$ мг/л.

* * *

Установлено, что максимальная сорбция ионов цинка и кадмия достигается при pH 9.0, ионов ртути(II) – при pH 2.0. Достаточно 30 мин контакта сорбата с сорбентом для максимальной сорбции ионов металлов. По полученным изотермам сорбции определены значения сорбционной емкости сорбента: по цинку – 171 мг/г, по кадмию – 99.7 мг/г и по ртути(II) – 593 мг/г. Рассчитанные значения средней свободной энергии адсорбции, равные $E_{Zn} = 8.22$ кДж/моль, $E_{Cd} = 8.70$ кДж/моль и $E_{Hg} = 11.95$ кДж/моль указывают на образование устойчивых химических связей. Установлено, что количественная десорбция ионов цинка и кадмия с сорбента достигается промыванием концентрата 10 мл 4 М HCl, а ионов ртути (II) – 10 мл 3 М HNO₃. Разработанная методика применена для определения ионов цинка, кадмия и ртути(II) в водопроводной г. Махачкалы и воде реки Сулак. Предел обнаружения ионов цинка и кадмия составляет $n \times 10^{-3}$ мг/л, ртути(II) – $n \times 10^{-5}$ мг/л.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Janani R., Baskar Gurunathan, Sivakumar K, Sunita Varjani, Huu Hao Ngo, Edgard Gnansounou. Advancements in heavy metals removal from effluents employing nano-adsorbents: Way towards cleaner production // Environ. Res. 2022. V. 203. Article 111815. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111815>
2. Маслакова Т.И., Первова И.Г., Желновач А.В., Маслаков П.А., Симонова Е.И., Вураско А.В. Сорбционные и физико-химические характеристики целлюлозосодержащих сорбентов, модифицированных гетарилформазанами // Сорбционные и хроматографические процессы. 2017. Т. 17. № 3. С. 398.
3. Дидух–Шадрина С.Л., Лосев В.Н., Мазняк Н.В., Трофимчук А.К. Применение кремнезема с иммобилизованной 2-нитрозо-1-нафтол-4-сульфокислотой для сорбционно-фотометрического определения палладия // Журн. аналит. химии. 2019. Т. 74. № 8. С. 574. (Didukh-Shadrina S.L., Losev V.N., Maznyak N.V., Trofimchuk A.K. Application of silica with immobilized 2-nitroso-1-naphthol-4-sulfonic acid for sorption-photometric determination of palladium // J. Anal. Chem. 2019. V. 74. № 8. P. 574.) <https://doi.org/10.1134/S0044450219080061>
4. Bo Li, Ming Li, Jinyao Zhang, Yuanfeng Pan, Zhihong Huang, Huining Xiao. Adsorption of Hg(II) ions from aqueous solution by diethylenetriaminepentaacetic acid-modified cellulose // Int. J. Biol. Macromol. 2019. V. 122. P. 149. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.10.162>
5. Raghu M.S., Kumar K. Yogesh, Srilatha Rao, Aravinda T., Sharma S.C., Prashanth M.K. Simple fabrication of reduced graphene oxide-few layer MoS₂ nanocomposite for enhanced electrochemical performance in supercapacitors and water purification // Physica B: Condensed Matter. 2018. V. 537. P. 336. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2018.02.017>
6. Bangda Wang, Yuexi Zhou, Lei Li, Hui Xua, Yinglong Suna, Yi Wang. Novel synthesis of cyano-functionalized mesoporous silicananospheres (MSN) from coal fly ash for removal of toxic metals from wastewater // J. Hazard. Mater. 2018. V. 345. P. 76. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.10.063>
7. Доронин С.Ю., Данчук А.И., Грунова Ю.В., Габидулина М.К. Концентрирование и тест-определение ионов тяжелых металлов с применением модифицированного нановолокна на основе полиакрилонитрила // Журн. аналит. химии. 2020. Т. 75. № 7. С. 597. (Doronin S.Yu., Danchuk A.I., Grunova Yu.V., Gabidulina M.K. Concentration and test determination of heavy metal ions using a modified nanofiber based on polyacrylonitrile // J. Anal. Chem. 2020. V. 75. № 7. P. 597). <https://doi.org/10.31857/S0044450220070051>
8. Оленин А.Ю., Коротков А.С. Спектрофотометрическое определение ионов Hg²⁺ с использованием золей наночастиц серебра, модифицированных цистеамином // Журн. аналит. химии. 2021. Т. 76. № 6. С. 530. (Olenin A.Yu., Korotkov A.S. Spectrophotometric determination of Hg²⁺ ions using sols of silver nanoparticles modified with cysteamine // J. Anal. Chem. 2021. V. 76. № 6. P. 530). <https://doi.org/10.31857/S0044450221060062>
9. Kumar Vikrant, Ki-Hyun Kim. Nanomaterials for the adsorptive treatment of Hg(II) ions from water // Chem. Eng. J. 2019. V. 358. P. 264. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.022>
10. Siti Khadijah Ab. Rahman, Nor Azah Yusof, Abdul Halim Abdullah, Faruq Mohammad, Azni Idris, Hamad A. Allohedan. Evaluation of porogen factors for the preparation of ion imprinted polymer monoliths used in mercury removal // PLOS ONE. 2018. P. 14.
11. Kostenko Elizaveta, Melnyk Lyudmila, Matko Svitlana, Malovanyu Myroslav. The use of sulphophtalein dyes immobilized on anionite AB-17X8 to determine the contents of Pb(II), Cu(II), Hg(II) and Zn(II) in liquid medium // Chem. Chem. Technol. 2017. V. 11. № 1. P. 117.
12. Zhiyong Xia, Lance Baird, Natasha Zimmerman, Matthew Yeager. Heavy metal ion removal by thiol functionalized aluminum oxidehydroxide nanowhiskers // Appl. Surface Sci. 2017. V. 416. P. 565. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.04.095>
13. Чернышева Е.А., Грабельных В.А., Леванова Е.П., Корчевин Н.А. Применение серосодержащего сорбента на основе лигнина для извлечения ртути из водных растворов // Изв. ВУЗов. Прикладная химия и биотехнология. 2017. Т. 7. № 3. С. 169.

14. *Прописцова Р.Ф., Саввин С.Б.* Синтез и свойства азосоединений на основе роданина и тиороданина // Журн. аналит. химии. 1973. Т. 28. № 2. С. 2277. (*Propiscova R.F., Savvin S.B.* Synthesis and properties of azo compounds based on rhodanine and thiородanine // J. Anal. Chem. 1973. V. 28. № 2. P. 2277.)
15. *Басаргин Н.Н., Оскотская Э.Р., Чеброва А.В., Розовский Ю.Г.* Сорбция цинка полимерными хелатообразующими сорбентами и ее применение в анализе природных вод // Журн. аналит. химии. 2008. Т. 63. № 3. С. 231. (*Basargin N.N., Oskotskaya E.R., Chebrova A.V., Rozovsky Yu.G.* Sorption of zinc by polymeric chelating sorbents and its application in the analysis of natural waters // J. Anal. Chem. 2008. V. 63. № 3. P. 231.)
16. *Грибанов Е.Н.* Физико-химические характеристики и механизм сорбции алюмосиликатом ионов некоторых металлов из водных растворов // Сорбционные и хроматографические процессы. 2020. Т. 20. № 6. С. 719. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2020.20/3139>
17. *Саунина И.В., Грибанов Е.Н., Оскотская Э.Р.* Атомно-абсорбционное определение Hg(II), Cd(II) и As(III) в природных и сточных водах после предварительного группового концентрирования // Западск. лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 2. С. 12. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-2-12-16>
18. *Зейналов Р.З., Татаева С.Д., Атаева Н.И.* Концентрирование и определение меди, цинка и кадмия хелатообразующим модифицированным сорбентом // Аналитика и контроль. 2013. Т. 17. № 1. С. 89.
19. *Мифтахова Ф.Р., Нгуен Т.К.Т., Галимова Р.З., Шайхиев И.Г., Свергузова С.В.* Исследование адсорбции ионов цинка кислотомодифицированными опилками акации ушковидной (*Acacia auriculiformis*) // Сорбционные и хроматографические процессы. 2019. Т. 19. № 5. С. 588. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2019.19/1174>
20. *Farideh Gheitasi, Shahriar Ghammaty, Mojgan Zende-hdel, Farzam Babaei Semiromi.* Removal of mercury (II) from aqueous solution by powdered activated carbon nanoparticles prepared from beer barley husk modified with Thiol/ Fe₃O₄ // J. Mol. Struct. 2022. V. 1267. Article 133555. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2022.133555>
21. *Manasi, Vidya Rajesh, Rajesh N.* Biosorption study of cadmium, lead and zinc ions onto halophilic bacteria and reduced graphene oxide // J. Environ. Chem. Eng. 2018. V. 6. № 4. P. 5053. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.07.042>
22. *Farida Khan, Naeem A., Israf Ud Din, Saeed T., Mshari A. Alotaibi, Abdulrahman I. Alharthi, Asad Habib, Tabassum Malik.* Synthesis, characterization and adsorption studies of h-BN crystal for efficient removal of Cd²⁺ from aqueous solution // Ceramics Int. 2021. V. 47. № 4. P. 4749. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.10.044>
23. *Коростелев П.П.* Приготовление растворов для химико-аналитических работ. М.: Наука, 1977. 400 с.
24. *Назаренко В.А., Антонович В.П., Невская Е.М.* Гидролиз ионов металлов в разбавленных растворах. М.: Атомиздат, 1979. 192 с.
25. *Увайсова С.М., Бабуев М.А.* Определение условий модификации анионитов АН-31 и АРА-8п иммобилизацией 5-(4-карбокисфенил-азо)-роданина // Сорбционные и хроматографические процессы. 2019. Т. 19. № 3. С. 344. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2019.19/751>
26. *Увайсова С.М., Бабуев М.А.* Концентрирование ионов ртути(II) полимерным модифицированным сорбентом на основе низкоосновного анионита АН-31 // Вестник ВГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2021. № 2. С. 20.
27. *Langmuir I.* Structure and basic properties of solids and liquids. Part I. Solids // J. Am. Chem. Soc. 1916. V. 38. № 11. P. 2221.
28. *Freundlich H.M.F.* Over the adsorption in solution // J. Phys. Chem. 1906. V. 57. P. 385.
29. *Стрельцова Е.А., Гросул А.А.* Адсорбция додецилсульфата натрия, хлорида додециламмония и твинов из водных растворов на парафине // Сорбционные и хроматографические процессы. 2014. Т. 14. № 1. С. 129.
30. *Зеленцов В.И., Дацко Т.Я.* Применение адсорбционных моделей для описания равновесия в системе оксигидроксид алюминия – фтор // Электронная обработка материалов. 2012. Т. 48. № 6. С. 65.