



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2022. Т. 22, вып. 4. С. 382–389

Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology, 2022, vol. 22, iss. 4, pp. 382–389

<https://ichbe.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2022-22-4-382-389>, EDN: BPGCDS

Научная статья

УДК 544.723:547.3

Твердофазные сорбенты на основе синтетических нановолокон и глауконита для извлечения магнезона I из водных сред



Л. М. Разуваева, А. Д. Фомина, Т. М. Махова, А. И. Аржанухина, С. Ю. Доронин ✉

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Разуваева Людмила Михайловна, магистрант 1-го года обучения Института химии, razuvaeva2000@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8958-9418>

Фомина Александра Дмитриевна, студент 4-го курса Института химии, Aleksafomina00@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6662-0136>

Махова Татьяна Михайловна, инженер испытательной лаборатории Института химии, tatianaahrimova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1896-6175>

Аржанухина Александра Ильинична, кандидат химических наук, доцент кафедры аналитической химии и химической экологии Института химии, alexandra-danchuk@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8378-774X>

Доронин Сергей Юрьевич, доктор химических наук, профессор кафедры аналитической химии и химической экологии Института химии, doroninsu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1115-1360>

Аннотация. Проведена сравнительная оценка сорбционной способности синтетических и природных сорбентов по отношению к фенолу и его некоторым производным. Методом электроформования в оптимальных условиях получены нетканые материалы на основе полиамида-6 (ПА-6) из формовочного раствора полимера, растворённого в смеси муравьиной и уксусной кислот. Осуществлена подготовка глинистого минерала ситовым методом, при этом выделена обогащённая фракция глауконита (200–500 мкм). Исследована морфология немодифицированных нановолокон, а также глауконита методом сканирующей электронной микроскопии. Предварительные эксперименты показали низкую эффективность сорбции фенола и его некоторых нитро- и хлорпроизводных используемыми в работе сорбентами. Для улучшения характеристик сорбции использован способ дериватизации исходных аналитов реакциями диазотирования и азосочетания. Спектрофотометрически определены концентрации магнезона I (нитрофенилазо-производное резорцина) с использованием градуировочной зависимости в диапазоне молярных концентраций магнезона I от $3 \cdot 10^{-6}$ до $2 \cdot 10^{-5}$ моль/л. Исследована сорбционная способность глауконита Саратовской области (Белоозерское месторождение) и синтетических нановолокон на основе ПА-6 по отношению к магнезону I. Оценено влияние pH на эффективность извлечения магнезона I глауконитом и нановолокном на основе ПА-6, кроме того, рассчитаны степени извлечения магнезона I указанными сорбентами, которые находились в интервале 88–100% при оптимальном pH ($\approx 3-6$). Проведенные эксперименты на модельном соединении – магнезоне I – позволили сделать вывод о потенциальной возможности применения глауконита Белоозерского месторождения Саратовской области и нановолокна на основе полиамида-6 для извлечения фенолов в виде их азопроизводных из различных вод.

Ключевые слова: сорбция, глауконит, нановолокно, электроформование, фенолы и его производные, экотоксиканты

Для цитирования: Разуваева Л. М., Фомина А. Д., Махова Т. М., Аржанухина А. И., Доронин С. Ю. Твердофазные сорбенты на основе синтетических нановолокон и глауконита для извлечения магнезона I из водных сред // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2022. Т. 22, вып. 4. С. 382–389. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2022-22-4-382-389>, EDN: BPGCDS
Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Solid-phase sorbents based on synthetic nanofibers and glauconite for extracting magnesium I from aqueous media

L. M. Razuvayeva, A. D. Fomina, T. M. Makhova, A. I. Arzhanukhina, S. Yu. Doronin ✉

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Lyudmila M. Razuvayeva, razuvaeva2000@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8958-9418>

Alexandra D. Fomina, Aleksafomina00@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6662-0136>

Tatiana M. Makhova, tatianaahrimova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1896-6175>

Alexandra I. Arzhanukhina, alexandra-danchuk@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8378-774X>

Sergey Yu. Doronin, doroninsu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1115-1360>



Abstract. A comparative evaluation of the sorption capacity of synthetic and natural sorbents with respect to phenol and some of its derivatives has been carried out. Electrospun nanofibers based on polyamide-6 (PA-6) were obtained under optimal conditions from a spinning solution of a polymer dissolved in a mixture of formic and acetic acids. The preparation of the clay mineral by the sieve method has been carried out, while the enriched fraction of glauconite (200–500 microns) has been isolated. The morphology of unmodified nanofibers, as well as glauconite, has been studied by scanning electron microscopy. Preliminary experiments showed low efficiency of sorption of phenol and some of its nitro- and chlorine derivatives by the sorbents used in this work. To improve the sorption characteristics, the method of derivatization of initial analytes by diazotization and azo coupling reactions has been used. The concentrations of magneson I (nitrophenylazo-derivative of resorcinol) have been determined spectrophotometrically using a calibration dependence in the range of magneson I molar concentrations from $3 \cdot 10^{-6}$ to $2 \cdot 10^{-5}$ mol/l. The sorption capacity of glauconite from the Saratov region (Beloozerskoye deposit) and synthetic nanofibers based on PA-6 with respect to magneson I has been studied. The effect of pH on the sorption efficiency of magneson I by glauconite and nanofibers based on PA-6 has been evaluated, in addition, the extraction coefficients of magneson I by these sorbents have been calculated, which were in the range of 88–100% at optimal pH ($\approx 3-6$). The experiments performed on a model compound, magneson I, led to the conclusion about the potential possibility of using glauconite from the Beloozerskoye deposit in the Saratov region and nanofibers based on polyamide-6 for the extraction of phenols in the form of their azo derivatives from various waters.

Keywords: sorption, glauconite, nanofiber, electroforming phenols and its derivatives, ecotoxicants

For citation: Разуваева Л. М., Фомина А. Д., Махова Т. М., Аржанухина А. И., Доронин С. Ю. Solid-phase sorbents based on synthetic nanofibers and glauconite for extracting magneson I from aqueous media. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2022, vol. 22, iss. 4, pp. 382–389 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2022-22-4-382-389>, EDN: BPGCDS

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

На сегодняшний день особенно остро стоит проблема определения различных экотоксикантов в природных и сточных водах. Основными загрязнителями вод являются нефть и нефтепродукты; токсичные синтетические вещества, такие как углеводородное топливо, термостойкие добавки к маслам – полихлорированные бифенилы (ПХБ), канцерогенные красители, высокомолекулярный поливинилхлорид (ПВХ), хлорорганические пестициды (включая ДДТ и продукты диенового синтеза), тяжелые металлы и другие органические [1] и неорганические токсиканты [2].

Среди вышеуказанных загрязнителей особенно выделяют фенол и его производные. В случае поступления в организм человека они могут вызывать серьезные нарушения, в частности, функций нервной системы [3]. Зачастую фенол является причиной онкологических и многих других заболеваний [4]. Источники поступления таких токсикантов в поверхностные воды – стоки предприятий нефтеперерабатывающей, сланцеперерабатывающей, лесохимической, коксохимической промышленности и др. [5].

Определение низких концентраций фенола и его производных в различных водах является актуальной задачей аналитической химии, что обусловлено его низкими предельно допустимыми концентрациями (ПДК). Так, в водоемах санитарно-бытового пользования ПДК составляет $0,001 \text{ мг/дм}^3$ [6]. Методы концентрирования позволяют решить данные задачи, в частности, методы твердофазной экстракции с использованием различных сорбентов, например, химически

модифицированных кремнеземов, полимеров, пористых углеродов и других. Некоторые из них приведены в таблице.

Эффективность сорбентов разнообразна и зависит от многих факторов. В качестве наиболее важных следует упомянуть химическую структуру сорбента и его пористость. На процесс сорбции также влияют pH, температура и т.д. [13].

Широкое применение среди сорбентов органических соединений нашли полимерные материалы на основе полиамида. Алифатические полиамиды обладают хорошими механическими свойствами, что обусловлено наличием межмолекулярных водородных связей. Сорбенты на основе полиамида применяются для извлечения хлорфенолов, анионных красителей и других органических веществ [14].

Кроме того, перспективным природным сорбентом является глауконит – калийсодержащий водный алюмосиликат, глинистый минерал из группы гидрослюд подкласса слоистых силикатов непостоянного и сложного переменного состава с высоким содержанием двух- и трехвалентного железа, калия, магния и еще более двадцати элементов [15]. Для глауконита характерно широкое распространение, доступность, дешевизна, термическая стойкость, радиационная устойчивость, кроме того, он обладает молекулярно-сорбционными и ионообменными свойствами, которые в значительной степени зависят от pH раствора [16].

В настоящей работе для изучения сорбционного концентрирования применяли природные и синтетические сорбенты: глауконит Белоозерского месторождения Саратовской



Данные по сорбции фенола и его производных природными и синтетическими сорбентами
 Table. Data on the sorption of phenol and its derivatives by natural and synthetic sorbents

№	Сорбтив Sorbitive	Сорбент Sorbent	Условия сорбции Sorption conditions	Характеристики сорбции Sorption characteristics	Лит-ра / A source
1	Фенол Phenol	Мергель мелоподобный / Chalk-like marl $S_{удел} = 30,807 \text{ м}^2/\text{г} (\text{m}^2/\text{g})$	$m = 0,5 \text{ г} (\text{g})$ $c_{(\text{фенола})} = 100 \text{ мг/л} (\text{mg/l})$ $t = 30 \text{ мин} (\text{min})$ $\text{pH } 5,45\text{--}7,55$	$\text{CE} = 1 \text{ мг/г} (\text{mg/g})$ $v_{уд} = 0,0708 \text{ ммол}/(\text{л}\cdot\text{мин})$ $R = 0,9823$	[7]
2	Фенол Phenol	Ш-Ст-ПЭИ Sh-St-PEI $S_{удел} = 49,91 \text{ м}^2/\text{г} (\text{m}^2/\text{g})$	$m = 0,2\text{--}0,5 \text{ г} (\text{g})$ $c_{(\text{фенола})} = 0,8 \text{ мг/л} (\text{mg/l})$ $t = 20 \text{ мин} (\text{min})$ $\text{pH} \sim 7$	$R = 0,984$	[8]
3	Фенол Phenol	Кора сосны Pine bark	$c_{(\text{сорбента})} = 5 \text{ г/дм}^3 (\text{g/dm}^3)$ $t = 120 \text{ мин} (\text{min})$ $\text{pH } 6$	$\text{CE} = 142,9 \text{ мг/г} (\text{mg/g})$ $R = 0,998$	[9]
4	2-НФ 2-NF	АУВ ACF $S_{удел} = 1288 \text{ м}^2/\text{г} (\text{m}^2/\text{g})$	$m = 0,2\text{--}0,5 \text{ г} (\text{g})$ $c_{(\text{фенола})} = 0,02\text{--}0,8 \text{ мг/мл} (\text{mg/l})$ $t = 5 \text{ мин} (\text{min})$ $\text{pH } 7$	$R = 0,96$	[10]
5	4-НФ 4-NF	Бентонит Bentonite	$c = 50 \text{ мг/л} (\text{mg/l})$ $t = 180 \text{ мин} (\text{min})$ $\text{pH } 6$	$\text{CE} = 284 \text{ мг/г} (\text{mg/g})$ $R = 98 \%$	[11]
6	3-НФ 3-NF	ПС-4 PS-4	$m = 0,01 \text{ г} (\text{g})$ $t = 60 \text{ мин} (\text{min})$ $\text{pH } 3\text{--}5$	$R = 0,96$	[12]

Список сокращений, применяемых в таблице: c – исходная концентрация аналита; R – степень извлечения; $S_{удел}$ – удельная площадь поверхности; $v_{уд}$ – удельная скорость сорбции; ПС-4 – полимерный сорбент на основе N-винилпирролидона (ФМ) и этиленгликольдиметакрилата (СА); CE – сорбционная емкость; Ш-Ст-ПЭИ – шунгит с привитыми группами полистирола с аминированием полиэтиленомоном; 4-НФ – 4-нитрофенол; 3-НФ – 3-нитрофенол; 2-НФ – 2-нитрофенол; АУВ – активированное углеродное волокно.

List of abbreviations used in Table: c – initial concentration of the analyte; R – degree of extraction; S_{spec} – specific surface area; v_{sp} – specific sorption rate; PS-4 – polymeric sorbent based on N-vinylpyrrolidone (FM) and ethylene glycol dimethacrylate (CA); CE – sorption capacity; Sh-St-PEI – shungite with grafted polystyrene groups with amination of polyethyleneimone; 4-NF, 4-nitrophenol; 3-NF, 3-nitrophenol; 2-NF, 2-nitrophenol; ACF – activated carbon fiber.

области, химическая формула которого – $(\text{K}, \text{H}_2\text{O}) \cdot (\text{Fe}^{3+}, \text{Al}, \text{Fe}^{2+}, \text{Mg})_2 \cdot [\text{Si}_3\text{AlO}_{10}](\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, а также полимерные нановолокна (нетканые материалы, (НМ)) на основе полиамида-6 (ПА-6) (рис. 1), полученные методом электроформования. Последние широко используются в различных областях, таких как тканевая инженерия, энергетика, катализ, защитная одежда, электроника, оптика и др., что в значительной степени связано с уникальными свойствами нановолокон, включая их малый диаметр, большую удельную поверхность, легкость модификации и др. [18].

Предварительные эксперименты показали низкую эффективность сорбции указанными сорбентами фенола и его некоторых нитро- и хлорпроизводных. Поэтому для улучшения

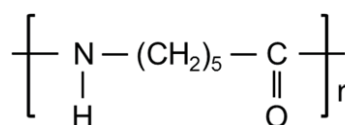


Рис. 1. Структурная формула полиамида-6
 Fig. 1. Structural formula of polyamide-6

характеристик сорбции предложен способ дериватизации исходных аналитов реакцией диазотирования и азосочетания, согласно схеме, представленной на рис. 2.

В настоящей работе для изучения сорбционных свойств синтетических нановолокон и природного глауконита в качестве модельного нитрофенилазо-производного резорцина выбран азокраситель магнезон I.

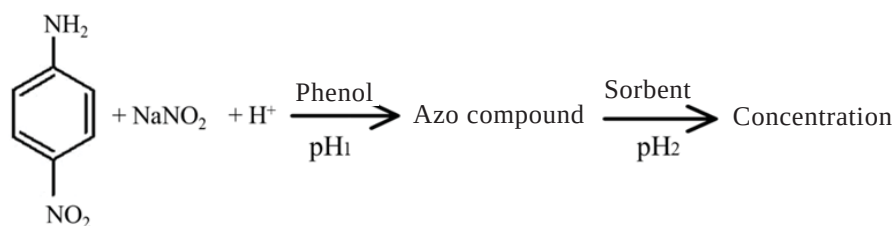


Рис. 2. Схема дериватизации и сорбции фенолов на примере системы фенол – 4-нитроанилин – нитрит – твердофазный сорбент

Fig. 2. Scheme of derivatization and sorption of phenols on the example of the system phenol – 4-nitroaniline – nitrite – solid-phase sorbent

Целью настоящей работы явилась сравнительная характеристика сорбционных свойств по отношению к магнезону I нановолокна на основе полиамида-6 и глауконита Белоозерского месторождения Саратовской области.

Материалы и методы

Для получения НМ применяли метод бескапиллярного электроформования, используя прибор Elmarco «Nanospider NS Lab200» (Чехия). Микрофотографии поверхности НМ, а также глауконита получены с помощью автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа MIRA 2 LMU, производства фирмы Tescan, оснащенного системой энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350 (Чехия).

Для получения нетканых материалов на основе ПА-6 готовый формовочный раствор полимера, полученный путем растворения навески массой 15 г в 85 мл смеси муравьиной и уксусной кислот в соотношении 1:2 соответственно, помещали в гальваническую ванну с погружённым в неё электродом, на который была натянута вольфрамовая проволока. После подачи высокого напряжения электрод вращался, а формовочный раствор полимера ПА-6, касаясь вольфрамовой проволоки, расщеплялся на тонкие струи (образуя конусы Тейлора), которые дрейфовали к заземленной подложке, таким образом получался нетканый материал. Параметры электроформования – расстояние между электродами 16–18 см, скорость вращения электрода 10–16 об/мин, напряжение 70–75 кВ, время электроформования 15–30 мин.

Подготовку глинистого минерала осуществляли ситовым методом, выделяли обогащённую фракцию глауконита (200–500 мкм), полученную из глауконитового песка методом магнитной сепарации и содержащую глауконита до 85%.

В работе применяли магнезон I ([4-(п-нитрофенилазо)резорцин], C₁₂H₉O₄N₃ ч.д.а., ТУ 6-09-166-74). Раствор магнезона I готовили растворением навески, массой 0,0648 г в 0,1 М растворе NaOH в колбе на 25 мл. Рабочие растворы с концентрациями 1·10⁻⁵, 2·10⁻⁵, 3·10⁻⁶, 7·10⁻⁶, 8·10⁻⁶, 9·10⁻⁶ М готовили путем разбавления дистиллированной водой стандартного раствора с концентрацией 1·10⁻³ М.

Концентрацию магнезона I определяли спектрофотометрически на спектрофотометре Shimadzu UV-1800 (Япония). Для построения градуировочной зависимости готовили растворы с молярной концентрацией магнезона I в интервале от 3·10⁻⁶ до 2·10⁻⁵ моль/л. Градуировочный график характеризуется уравнением вида: $y = 0,042x$ с коэффициентом корреляции 0,999 (рис. 3).

Для создания оптимального pH раствора магнезона I добавляли 4 мл соответствующего ацетатно-аммиачного буферного раствора в интервале от 3 до 10. Растворы тщательно перемешивали.

Для изучения сорбции магнезона I в статическом режиме исследуемые образцы НМ и глауконита помещали в плоскодонные колбы вместимостью 25 мл, добавляли раствор изучаемого азокрасителя с постоянной концентрацией ($c = 2 \cdot 10^{-5}$ М) и выдерживали при комнатной температуре в течение двух часов при непрерывном перемешивании на горизонтальном шейкере.

Контроль pH осуществляли на pH-метре рХ-150Мп (Беларусь), погрешность измерения $\pm 0,01$ pH.

Для количественного определения эффективности извлечения магнезона I из растворов с применением НМ на основе ПА-6 и глауконита в качестве сорбента рассчитывали степень извлечения (R , %).

$$R = \frac{A_0 - A}{A_0} \cdot 100,$$

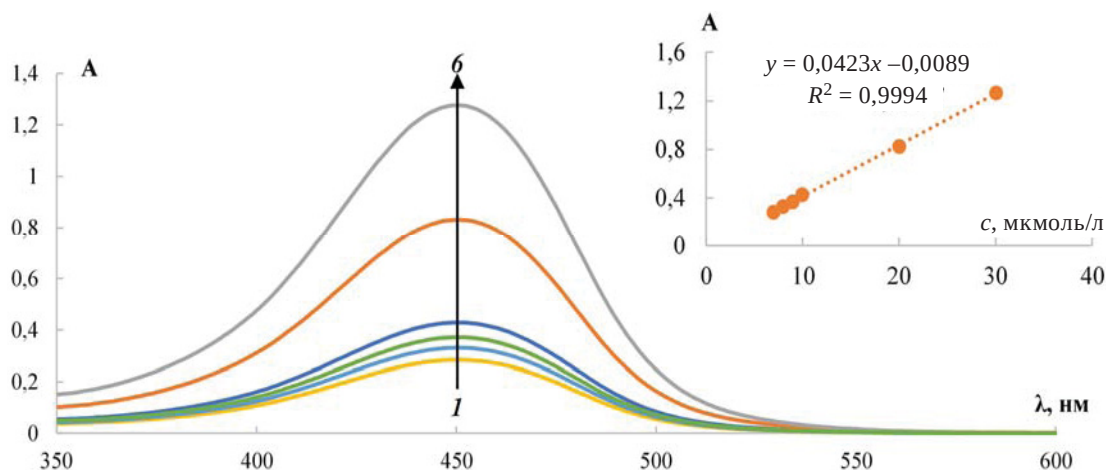


Рис. 3. Электронные спектры поглощения магнесона I ($c = 1 - 3 \cdot 10^{-6}$; $2 - 7 \cdot 10^{-6}$; $3 - 8 \cdot 10^{-6}$; $4 - 9 \cdot 10^{-6}$ М; $5 - 1 \cdot 10^{-5}$; $6 - 2 \cdot 10^{-5}$) (цвет online)

Fig. 3. Electronic absorption spectra of magneson I ($c = 1 - 3 \cdot 10^{-6}$; $2 - 7 \cdot 10^{-6}$; $3 - 8 \cdot 10^{-6}$; $4 - 9 \cdot 10^{-6}$ M; $5 - 1 \cdot 10^{-5}$; $6 - 2 \cdot 10^{-5}$) (color online)

где A_0 – оптическая плотность раствора магнесона I до сорбции НМ, A – оптическая плотность раствора после сорбции.

Результаты и их обсуждение

Предварительно исследовали морфологию модифицированных нановолокон, а также не модифицированного глауконита методом сканирующей электронной микроскопии (рис. 4). Как видно из рис. 4, а, нановолокна на основе ПА-6 имели в поперечном сечении – округлую форму; поверхности нановолокон однородны и не имели видимых дефектов. Средние диаметры отдельных волокон исходного материала ПА-6 находились в пределах от 80 до 120 нм.

Исследованные образцы глауконита имели слоистую поверхность, состоящую из чешуек различной формы с толщиной от 10 до 50 нм, расстояние между чешуйками составило 10–200 нм (см. рис. 4, б). Полученные результаты свидетельствуют о принадлежности глауконита к микропористым образцам с относительно небольшой внешней поверхностью.

Одним из важных факторов, влияющих на сорбцию магнесона I, является кислотность среды. Во-первых, в зависимости от pH молекула азокрасителя может находиться в растворе в различных формах (рис. 5). Так, в кислой среде образуется протонированная форма магнесона I (форма А), при увеличении pH раствора (щелочная среда) форма А переходит в аци-форму Б.

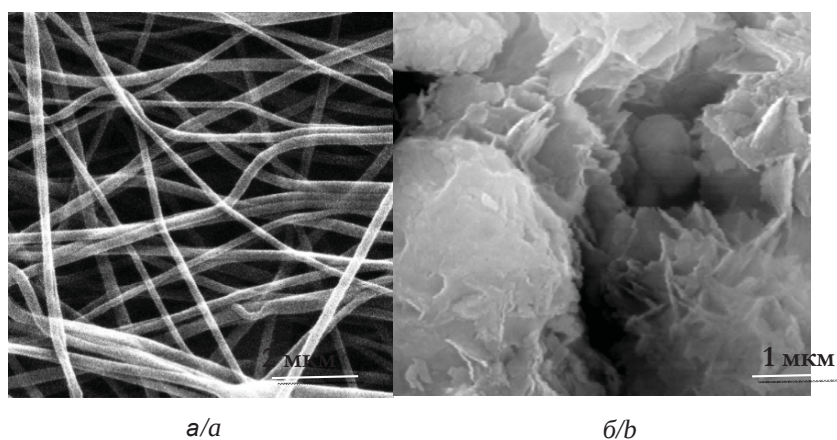


Рис. 4. Электронные микрофотографии: а – НМ на основе полиамида-6; б – глауконита

Fig. 4. Electron micrographs: a – NM based on polyamide-6; b – glauconite

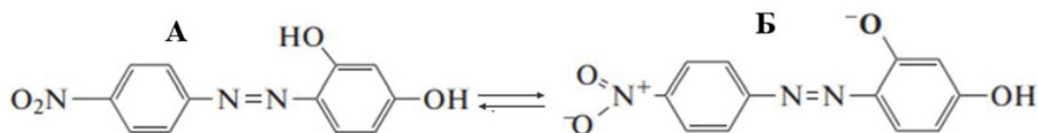


Рис. 5. Химическая структура магнезона I в кислой (А) и щелочной (Б) средах

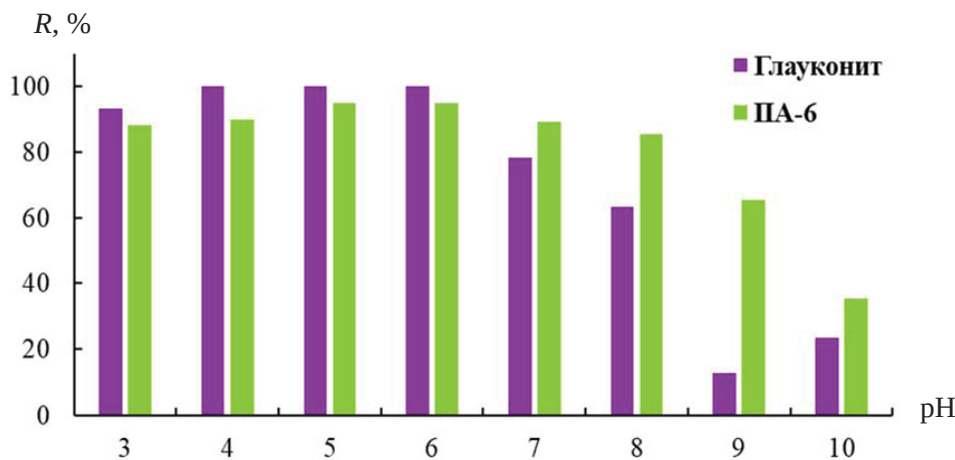
Fig. 5. Chemical structure of magneson I in acidic (A) and alkaline (B) media

При образовании аци-формы атом водорода из фенольного гидроксила переходит к атому кислорода в нитрогруппе. Во-вторых, pH влияет на состояние функциональных групп применяемого сорбента. Так, для глауконита при $\text{pH} < 8,9$ преобладает адсорбция ионов H^+ , в результате чего поверхность заряжается положительно, при этом глауконит способен проявлять катионообменные свойства, тогда как при $\text{pH} > 8,9$ он может быть анионообменником.

В настоящей работе изучено влияния pH сорбции магнезона I в статических условиях с использованием ПА-6 и глауконита с учетом его кинетики сорбции.

Из рис. 6 видно, что ПА-6 ($(-\text{NH}-(\text{CH}_2)_5-\text{CO}-)_n$) и глауконит весьма эффективны в качестве сор-

бентов для извлечения магнезона I из водных сред в диапазоне pH от 3 до 7, что подтверждается рассчитанными степенями извлечения азокрасителя, которые были достаточно близки и достигали от 88 до 100%. В случае применения ПА-6 максимальная сорбция в кислой среде связана с электростатическим взаимодействием анионных групп (NO_2^-) (см. рис. 5, форма А) азокрасителя с положительно заряженными протонированными в кислой среде амидными группами, а также концевыми аминогруппами полимера с образованием ионных связей. Водородные связи, а также межмолекулярные силы Ван-дер-Ваальса также могут вносить вклад в механизм сорбции азокрасителей волокном на основе ПА-6.

Рис. 6. Зависимость степени извлечения магнезона I от pH раствора. c (магнезона I) = $2 \cdot 10^{-5}$ М, $V = 25$ мл, $m_{\text{нм}} = 0,015-0,020$ г, $m_{\text{глауконита}} = 0,5$ г (цвет online)Fig. 6. The dependence of the degree of extraction of magneson I on the pH of the solution. c (magneson I) = $2 \cdot 10^{-5}$ M, $V = 25$ ml, $m_{\text{нм}} = 0,015-0,020$ g, $m_{\text{glauconite}} = 0.5$ g (color online)

В случае применения глауконита максимальная сорбция азокрасителя также наблюдалась в кислой среде, что связано с содержанием протонированных силанольных групп ($\equiv\text{Si}-\text{OH}$) в глауконите, который, в свою очередь, проявляет свойства слабого основания, что приводит к формированию слабощелочной среды водной вытяжки сорбента. Основной вклад в механизм сорбции магнезона I глауконитом, вероятно, вно-

сят образующиеся ионные связи в кислой среде между заряженными частицами азокрасителя и поверхностью минерала, как и в случае ПА-6. Кроме того, может иметь место также и физический характер сорбции. В диапазоне pH раствора от 7 до 8 наблюдается небольшой спад степеней извлечения (R , %) магнезона I, а при pH больше 8 единиц – значительное ухудшение сорбции для двух сорбентов, что связано с изменением



их поверхностного заряда на положительный и электростатическим отталкиванием молекул азокрасителя и групп изучаемых сорбентов.

Выводы

Таким образом, можно сделать вывод об эффективном применении различных по природе сорбентов для извлечения магнезона I из водных сред, который, в свою очередь, является модельным соединением и продуктом дериватизации некоторых фенолов (в частности, резорцина), являющихся приоритетными загрязнителями вод. Исходя из этого, можно заключить о возможности применения ПА-6 и глауконита, которые являются доступными, нетоксичными, термостойкими, достаточно экономичными сорбентами, для твердофазного концентрирования некоторых фенолов на уровне ПДК в виде их азопроизводных из объектов окружающей среды, в частности природных вод с целью дальнейшего их определения, например, методами спектрофотометрии или колориметрии. Также в дальнейшем возможность регенерации таких сорбентов позволит их многократное использование и обеспечит экологичность их применения в аналитической химии. Кроме того, в перспективе нетканые материалы на основе ПА-6 можно использовать для создания тест-средств указанных экотоксикантов.

Список литературы

1. Истрашкина М. В., Атаманова О. В., Косарев А. В., Тихомирова Е. И. Применение фильтрующих загрузок в системах водоотведения для очистки сточных вод // Вестник КРСУ. 2017. Т. 17, № 5. С. 149–152.
2. Яхшиева З. З., Ахмаджанова Ё. Т. Загрязнение водных объектов неорганическими токсикантами // Science and Education. 2021. Т. 2, № 10. С. 107–108.
3. Сычева Е. В. К вопросу о критериях оценки экологического риска воздействия фенолов на водные экосистемы // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2008. Т. 18, № 2. С. 258–263.
4. Филова В. Ф. Общая токсикология / под ред. Б. А. Курьяндского. М.: Медицина, 2002. 608 с.
5. Шакирова В. В., Пакалова Е. В., Типишова А. В. Новый сорбент для очистки сточных вод от токсикантов органического и неорганического происхождения // Научный потенциал регионов на службу модернизации. 2012. № 2 (3). С. 61.
6. Мальцева В. С., Сазонова А. В. Исследование механизма сорбции фенола из сточных вод природными сорбентами // Известия ЮЗГУ. Серия Физика и химия. 2013. № 1. С. 66–73.
7. Беляева О. В., Голубева Н. С., Великанова Е. С., Гора Н. В. Использование новых углеродных адсорбентов для очистки воды от фенола // Техника и технология пищевых производств. 2012. № 1. С. 143.

8. Акимбаева А. М. Сорбция фенола модифицированными шунгитами // Нефтехимия. 2007. Т. 47, № 3. С. 225–229.
9. Галимова Р. З., Шайхиев И. Г., Алмазова Г. А. Изучение термодинамики сорбции фенола на осиновых опилках // Вестник Казанского технологического университета. 2016. № 1. С. 60–63.
10. Фазылова Г. Ф., Валинурова Э. Р., Хатмуллина Р. М., Кудашева Ф. Х. Сорбционные параметры производных фенолов на различных углеродных материалах // Сорбционные и хроматографические процессы. 2013. Т. 13, вып. 5. С. 728–731.
11. Махова Т. М., Доронин С. Ю. Глауконит – как сорбент 4-нитрофенола // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2021. Т. 21, вып. 2. С. 152–158. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2021-21-2-152-158>
12. Суханов П. Т., Кушниц А. А. Сорбция нитрофенолов из водных сред полимерными сорбентами на основе N-винилпирролидона // Вестник Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 2019. Т. 60, № 2. С. 117–122.
13. Назаров А. М., Латыпова Ф. М., Арасланова Л. Х., Сальманова Э. Р., Туктарова И. О. Исследование эффективности природных и модифицированных сорбентов для очистки промышленных сточных вод от ионов тяжелых металлов // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2018. Т. 10, № 5. С. 133–134. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-5-125-143>
14. Xu F., Shili X., Mingwu S., Rui G., Shanyuan W., Xiangyang Shi. Fabrication and characterization of water-stable electrospun polyethyleneimine/polyvinyl alcohol nanofibers with super dyesorption capability // New J. Chem. 2011. Iss. 2. P. 360–368. <https://doi.org/10.1039/C0NJ00764A>
15. Махова Т. М., Доронин С. Ю. Нановолокна как сорбенты для концентрирования органических токсикантов из водных сред // Бутлеровские сообщения. 2018. Т. 53, № 3. С. 61.
16. Вениг С. Б., Сержантов В. Г., Чернова Р. К., Щербакова Н. Н., Селифонова Е. И., Сплюхин В. П., Хапцев З. Ю. Отечественные технологии получения и применения глауконитовых сорбентов для очистки и восстановления объектов от химических загрязнений // Химическая безопасность. 2018. Т. 2, № 2. С. 183–198. <https://doi.org/10.25514/CHS.2018.2.14114>
17. Синельцев А. А., Губина Т. И., Антонова И. А., Сержантов В. Г. Эффективный адсорбент на основе природных глауконитов в очистке воды от тяжелых металлов // Химическая физика. 2012. Т. 31, № 10. С. 29–30.

References

1. Istrashkina M. V., Atamanova O. V., Kosarev A. V., Tikhomirova E. I. Application of filter loadings in wastewater disposal systems for wastewater treatment. *Bulletin of KRSU*, 2017, vol. 17, no. 5, pp. 149–152 (in Russian).



2. Yakhshieva Z. Z., Akhmedzhanova E. T. Pollution of water bodies with inorganic toxicants. *Science and Education*, 2021, vol. 2, no. 10, pp. 107–108 (in Russian).
3. Sycheva E. V. On the issue of criteria for assessing the environmental risk of phenols' impact on aquatic ecosystems. *Izvestiya of the St. Petersburg University of Railways*, 2008, vol. 18, no. 2, pp. 258–263 (in Russian).
4. Filova V. F. *Obshchaya toksikologiya. Pod red. B. A. Kurlandsky* [Kurlandsky B. A., ed. General Toxicology]. Moscow, Meditsina Publ., 2002. 608 p. (in Russian).
5. Shakirova V. V., Pikalova E. V., Tipishova A. V. A new sorbent for wastewater treatment from toxicants of organic and inorganic origin. *The Scientific Potential of the Regions for the Service of Modernization*, 2012, no. 2 (3), pp. 61 (in Russian).
6. Maltseva V. S., Sazonova A. V. Investigation of the mechanism of phenol sorption from wastewater by natural sorbents. *Izvestiya YuZGU. Physics and Chemistry Series*, 2013, no. 1, pp. 66–73 (in Russian).
7. Belyaeva O. V., Golubeva N. S., Velikanova E. S., Gora N. V. Use of new carbon adsorbents for water purification from phenol. *Equipment and Technology of Food Production*, 2012, no. 1, pp. 143 (in Russian).
8. Akimbayeva A. M. Sorption of phenol by modified shungites. *Petrochemistry*, 2007, vol. 47, no. 3, pp. 225–229 (in Russian).
9. Galimova R. Z., Shaikhiev I. G., Almazova G. A. The study of thermodynamics of phenol sorption on aspen sawdust. *Bulletin of Kazan Technological University*, 2016, no. 1, pp. 60–63 (in Russian).
10. Fazylova G. F., Valinurova E. R., Khatmullina R. M., Kudasheva F. H. Sorption parameters of phenol derivatives on various carbon materials. *Sorption and Chromatographic Processes*, 2013, vol. 13, iss. 5, pp. 728–731 (in Russian).
11. Makhova T. M., Doronin S. Yu. Glauconite as a sorbent of 4-nitrophenol. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2021, vol. 21, iss. 2, pp. 152–158 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2021-21-2-152-158>
12. Sukhanov P. T., Kushnir A. A. Sorption of nitrophenols from aqueous media with polymer sorbents based on N-vinylpyrrolidone. *Bulletin of Moscow University. Ser. 2. Chemistry*, 2019, vol. 60, no. 2, pp. 117–122 (in Russian).
13. Nazarov A. M., Latypova F. M., Araslanova L. H., Salmanova E. R., Tuktarova I. O. Investigation of the effectiveness of natural and modified sorbents for industrial wastewater treatment from heavy metal ions. *Nanotechnologies in Construction: Scientific Online Journal*, 2018, vol. 10, no. 5, pp. 133–134 (in Russian). <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-5-125-143>
14. Xu F., Shili X., Mingwu S., Rui G., Shanyuan W., Xiangyang Shi. Fabrication and characterization of water-stable electrospun polyethyleneimine/polyvinyl alcohol nanofibers with super desorption capability. *New J. Chem.*, 2011, iss. 2, pp. 360–368. <https://doi.org/10.1039/C0NJ00764A>
15. Makhova T. M., Doronin S. Yu. Nanofibers as sorbents for the concentration of organic toxicants from aqueous media. *Butlerovskie Communications*, 2018, vol. 53, no. 3, pp. 61 (in Russian).
16. Venig S. B., Serzhantov V. G., Chernova R. K., Shcherbakova N. N., Selifonova E. I., Splyukhin V. P., Khaptsev Z. Yu. Domestic technologies for obtaining and applying glauconite sorbents for cleaning and restoring objects from chemical contamination. *Chemical Safety*, 2018, vol. 2, no. 2, pp. 183–198 (in Russian). <https://doi.org/10.25514/CHS.2018.2.14114>
17. Sineltsev A. A., Gubina T. I., Antonova I. A., Sergeants V. G. Effective adsorbent based on natural glauconites in water purification from heavy metals. *Chemical Physics*, 2012, vol. 31, no. 10, pp. 29–30 (in Russian).

Поступила в редакцию 28.05.22; одобрена после рецензирования 22.08.22; принята к публикации 31.08.22
The article was submitted 28.05.22; approved after reviewing 22.08.22; accepted for publication 31.08.22