



Научная статья

УДК 541.183[»]

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2021-21-1-23-30>

Адсорбция органических реагентов природным бентонитом, модифицированным полигидроксикомплексами алюминия и железа (III)



Нат. В. Никитина¹✉, А. П. Ламихова¹, Над. В. Никитина², И. А. Казаринов¹

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Институт химии, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

²ООО «Научно-исследовательский институт технологий органической, неорганической химии и биотехнологий» (ООО «НИИТОНХ и БТ»), Россия, 410005, г. Саратов, ул. Большая Садовая, д. 239

Никитина Наталья Владимировна, аспирант кафедры физической химии, nikitina.natali0208@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9228-1342>

Ламихова Анна Павловна, магистрант, mareidrei@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2596-4725>

Никитина Надежда Владимировна, кандидат химических наук, старший научный сотрудник, nikitinanadia2610@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1133-5370>

Казаринов Иван Алексеевич, доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой физической химии, kazarinovia@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4858-9614>

Аннотация. Получены эффективные наноструктурные сорбенты на основе природного бентонита, модифицированного полигидроксикомплексами алюминия и железа(III). Изучен элементный состав полученных сорбентов. Для исследуемых образцов сорбентов была определена площадь удельной поверхности. Показано, что модифицированные сорбенты на основе природного бентонита являются наноструктурными объектами. Методом ИК-спектроскопии установлено, что модифицирование природного бентонита приводит к изменению его структурных свойств. При изучении сорбционного процесса на модифицированных сорбентах установлено, что модифицирование бентонита соединениями алюминия и железа(III) методом «соосаждения» приводит к увеличению сорбционной ёмкости полученных сорбентов. Сорбционные свойства полученных сорбентов проверяли по отношению к ряду органических красителей анионного и катионного типа. Установлено, что максимальная эффективность сорбции достигается для извлечения из воды веществ катионного типа, в том числе и органических красителей.

Ключевые слова: бентонит, сорбция, сорбция органических реагентов, полигидроксикомплексы, наноструктурные сорбенты

Для цитирования: Никитина Нат. В., Ламихова А. П., Никитина Над. В., Казаринов И. А. Адсорбция органических реагентов природным бентонитом, модифицированным полигидроксикомплексами алюминия и железа (III) // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2021. Т. 21, вып. 1. С. 23–30. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2021-21-1-23-30>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

Article

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2021-21-1-23-30>

Adsorption of organic reagents by natural bentonites modified with aluminum and iron (III) polyhydroxocations

Natalya V. Nikitina¹✉, nikitina.natali0208@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9228-1342>

Anna P. Lamikhova¹, mareidrei@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2596-4725>

Nadezhda V. Nikitina², nikitinanadia2610@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1133-5370>

Ivan A. Kazarinov¹, kazarinovia@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4858-9614>

¹Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

²LLC “Scientific research Institute technology organic, inorganic chemistry and biotechnologies” (LLC «NIFONG and BT»), 239 Bolshaya Sadovaya St., Saratov 410005, Russia

Abstract. The effective nanostructured sorbents based on natural bentonite modified with aluminum and iron (III) polyhydroxocations were obtained. The elemental composition of the obtained sorbents was studied. The specific surface area was determined for the studied samples. It was shown that modified sorbents based on natural bentonite were nanostructured objects. IR spectroscopy showed that modification of natural bentonite led to the changes in its structural properties. While studying the sorption process on modified sorbents, it was found that the modification of bentonite with aluminum and iron (III) compounds using the “codeposition” method led to the increase in the sorption capacity of the obtained



sorbents. The sorption properties of the obtained sorbents were tested in relation to a number of organic dyes of the anionic and cationic types. It was established that the maximum sorption efficiency was achieved for extracting cationic substances from water, including organic dyes.

Keywords: bentonite, sorption, sorption of organic reagents, polyhydroxocations

For citation: Nikitina Nat. V., Lamikhova E. P., Nikitina Nad. V., Kazarinov I. A. Adsorption of organic reagents by natural bentonites modified with aluminum and iron (III) polyhydroxocations. *Izvestiya of Saratov University. New Series. Series: Chemistry. Biology. Ecology*, 2021, vol. 21, iss. 1, pp. 23–30. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2021-21-1-23-30>

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

Введение

Природные глинистые материалы успешно используются в качестве сорбентов как неорганических, так и органических соединений благодаря большому числу активных кислотных и основных центров на поверхности глины. Одним из преимуществ глинистых минералов является то, что их структура позволяет провести целенаправленное модифицирование с целью регулирования поверхностных свойств и адсорбционных характеристик.

Повышение адсорбционных характеристик природных алюмосиликатов возможно путём ионного обмена, обработкой их кислотами, щелочами и солями различных металлов, которые приводят к увеличению концентрации кислотных и основных центров, изменению энергии переноса заряда, облегчению электронных переходов и подвижности ионов.

С практической точки зрения среди глинистых минералов особое место занимает бентонит, модифицированные образцы которого находят широкое применение при очистке сточных вод от химических загрязнений неорганической и органической природы [1]. При сравнении адсорбционной активности по отношению к органическим соединениям бентонитовые глины имеют преимущество перед цеолитами из-за большого межплоскостного расстояния, куда легко проникают длинноцепочечные органические соединения.

Целью настоящей работы является изучение физико-химических характеристик и сорбционной способности модифицированных полигидроксокаатионами алюминия и железа(III) сорбентов на основе бентонита по отношению к органическим реагентам.

Материалы и методы

В работе был использован природный бентонит Саригюхского месторождения (Иждеванский район, Республика Армения) и его Fe(III)- и Al-модифицированные формы. Бентонит был модифицирован полигидроксокаатионами железа(III) и алюминия методом «соосаждения». Образцы были гранулированы методом вихревой накатки и отожжены при температуре 550° С в инертной атмосфере аргона [2].

Количественный анализ элементного состава производился на энергодисперсионном рентгеновском флуоресцентном спектрометре EDX–720 (SHIMADZU, Япония) методом фундаментальных параметров.

Пористую структуру образцов определяли по низкотемпературной адсорбции азота на быстройдействующем анализаторе сорбции газов Quantachrome NOVA (США). Для измерения удельной поверхности твёрдых образцов использовался метод Брунауэра–Эммета–Тейлора (БЭТ). Для измерения объёма пор и определения распределения пор по размерам использовался метод Barrett-Joyner-Halenda (ВЈН).

Химический состав природного бентонита, а также модифицированных сорбентов на его основе был изучен методом инфракрасной спектроскопии. ИК-спектры снимали на ИК-фурье-спектрометре ФСМ-1201.

Для изучения сорбционной способности модифицированных сорбентов готовили исходные растворы красителей «метиленовый голубой», относящийся к классу хинониновых красителей, «конго красный», относящийся к классу диазокрасителей, «кислотный хром тёмно-синий», «эриохром чёрный Т», «метиленовый оранжевый», относящиеся к классу азокрасителей, «крезоловый красный», относящийся к классу трифенилметановых красителей. Для построения градуировочного графика готовили растворы красителей с концентрациями 1.0; 2.5; 5.0; 7.5; 10.0 мг/л из исходного раствора с концентрацией 100 мг/л [3]. Значения оптической плотности растворов снимали на спектрофотометре КФК–3 относительно дистиллированной воды. Строили графики зависимости оптической плотности от концентрации красителя $C_{\text{красителя}}$. Содержание красителя в водной фазе определяли спектрофотометрически по градуировочному графику с использованием спектрофотометра при соответствующих длинах волн λ : метиленовый голубой – 668 нм, метиленовый оранжевый – 464 нм, конго красный – 505 нм, кислотный хром тёмно-синий – 550 нм, крезоловый красный – 434 нм, эриохром чёрный Т – 525 нм [4].



По средним значениям равновесных концентраций (не менее двух параллельных измерений) величину адсорбции рассчитывали по следующей формуле (1):

$$A = \frac{(C_{\text{исх}} - C_{\text{равн}}) \cdot V}{m}, \quad (1)$$

где A – адсорбция, мг/г; $C_{\text{исх}}$ – исходная концентрация исследуемых ионов в растворе, мг/л; $C_{\text{равн}}$ – равновесная концентрация исследуемых ионов в растворе, мг/л; V – объём исследуемого раствора, л; m – масса сорбента, взятого для анализа, г.

Объекты исследования:

- образец 1 – исходный порошок природного бентонита;
- образец 1-ГО – исходный порошок природного бентонита, гранулированный методом вихревой накатки и отожжённый при 550°C в инертной атмосфере аргона;
- образец Fe-МБГО – исходный порошок природного бентонита, модифицированный полигидроксокаатионами железа(III) по методу «со-

осаждения», гранулированный методом вихревой накатки и отожжённый при температуре 550°C в инертной атмосфере аргона;

– образец Al-МБГО, исходный порошок природного бентонита, модифицированный полигидроксокаатионами алюминия по методу «соосаждения», гранулированный методом вихревой накатки и отожжённый при температуре 550°C в инертной атмосфере аргона.

Результаты и их обсуждение

Элементный состав исследуемых сорбентов

Анализ элементного состава исследуемых сорбентов показал, что основными элементами в образцах сорбентов являются кремний и алюминий с примесями железа, кальция, калия, титана и циркония (табл. 1). Модифицирование бентонита полигидроксокаатионами Al^{3+} и Fe^{3+} приводит к повышению концентрации соответствующего элемента в образце бентонита. Это повышение происходит в результате замещения обменных катионов глины.

Таблица 1 / Table 1

Элементный состав исследуемых сорбентов
The elemental composition of the studied sorbents

Элемент / Element	Содержание элементов, масс. % / Content of elements, mass. %			
	Образец 1 / Sample 1	Образец 1-ГО / Sample 1-GO	Образец Fe-МБГО / Sample Fe-MBGO	Образец Al-МБГО / Sample Al-MBGO
Si	49.0	43.0	22.1	46.0
Fe	24.8	31.2	68.4	27.9
Ca	9.3	8.2	1.1	3.3
Al	7.6	7.7	4.5	13.0
K	5.1	4.3	1.8	4.9
Ti	2.4	2.3	1.0	2.3
Zr	0.6	0.8	0.4	0.8
Другие / Other	1.2	2.6	0.8	1.8

Пористая структура модифицированных сорбентов

Модифицирование бентонита полигидроксокаатионами железа(III) и алюминия приводит к увеличению площади удельной поверхности за счёт образования первичных щелевидных микропор и формирования слоистой столбчатой структуры [5] (табл. 2).

Из данных табл. 2 видно, что модифицирование бентонита приводит к уменьшению числа макропор (>8 нм) и увеличению числа микро- и мезопор (1.5–4.0 нм), в сравнении с исходным бентонитом. Большая часть пор всех модифицированных образцов приходится на поры размером 1.5–8.0 нм [2, 6].

ИК-спектральный анализ

ИК-спектры образцов отражают набор полос поглощения, характерный для структуры монтмориллонита (рис. 1) [7].

В области 4000–3000 см^{-1} расположены полосы валентных колебаний OH-групп, связанные с октаэдрическими катионами, а также молекул воды, во второй области 1400–400 см^{-1} расположены полосы силикатной структуры [8, 9].

ИК-спектры содержат характерные для основной фазы монтмориллонита полосы в области валентных и деформационных колебаний структурных групп, а также полосы явно характерных примесей – коалинита и α -кварца. Результаты идентификации ИК-спектров всех образцов сор-



Таблица 2 / Table 2

Основные характеристики пористой структуры модифицированных сорбентов на основе бентонита
The basic characteristics of the porous structure of modified sorbents based on bentonite

Образец / Sample	Удельная поверхность $S_{уд}$, м ² /г / Specific surface, m ² /g	Объем пор $V_{пор}$, см ³ /г / Pore volume V_{por} , cm ³ /g	Распределение пор по радиусам, % / The distribution of the pore radii, %			
			1.5–2.0 нм / nm	2.0–4.0 нм / nm	4.0–8.0 нм / nm	более 8.0 нм / more than 8.0 nm
Образец 1 / Sample 1	51	0.061	9	21	21	49
Образец 1-ГО / Sample 1-GO	37	0.092	6	16	23	55
Образец Al-МБГО / Sample Al-MBGO	67	0.112	21	43	20	16
Образец Fe-МБГО / Sample Fe-MBGO	104	0.114	21	42	21	16

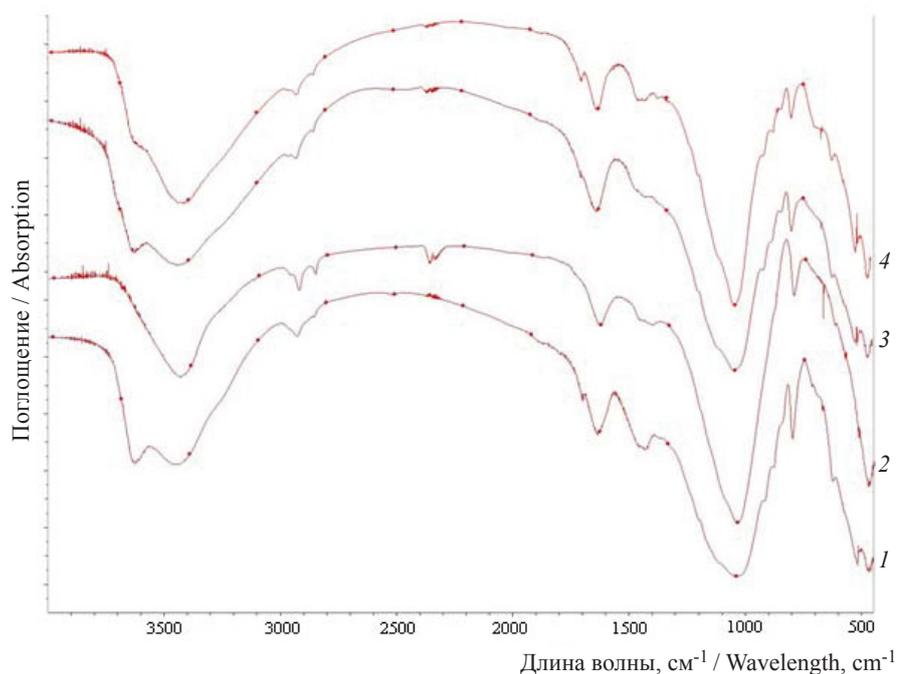


Рис. 1. ИК-спектры исследуемых сорбентов: 1 – образец 1, 2 – образец 1-ГО, 3 – образец Al-МБГО, 4 – образец Fe-МБГО

Fig. 1. The IR spectra of the studied sorbents: 1 – sample 1, 2 – sample 1-GO, 3 – sample Al-MBGO, 4 – sample Fe-MBGO

бентов обобщены в табл. 3. Спектры указывают на то, что образцы являются полифазными.

Изучение сорбционной способности модифицированных сорбентов

Навески исследуемых образцов сорбентов массой 2 г заливали дистиллированной водой на 1 ч, затем декантировали и заливали 100 мл модельного раствора (крезоловый красный, метиленовый голубой, конго красный, кислотный хром тёмно-синий, метиленовый оранжевый, эриохром чёрный Т) различной концентрации, выдерживали 2 ч до достижения равновесной концентрации в

растворе. Затем отбирали пробы из средних слоёв раствора. Данные по кинетике сорбции этих органических реагентов на исследуемых сорбентах приведены на примере раствора крезоловый красный, метиленовый голубой, конго красный, метиленовый оранжевый (рис. 2–5).

На рис. 6–9 (а) представлены изотермы сорбции органических красителей на исследуемых сорбентах. Полученные изотермы аппроксимируются уравнением типа Ленгмюра. Уравнение изотермы сорбции Ленгмюра, выведенное на основе молекулярно-кинетической теории и

Волновые числа (ν , cm^{-1}) максимумов поглощения в ИК-спектрах исследуемых образцов сорбентов
The wave numbers (ν , cm^{-1}) of the absorption maxima in the IR spectra of the studied sorbent samples

Структурные группы / Structural group	Al-Al-OH	Al-Fe-OH	H ₂ O	Si-O-Si
Образец 1 / Sample 1				
Валентные колебания / Stretching vibrations	3629	–	3449	1046
Деформационные колебания / Deformation vibrations	–	877	1634	796; 623; 515; 469
Образец 1-ГО / Sample 1-GO				
Валентные колебания / Stretching vibrations	–	–	3439	1041
Деформационные колебания / Deformation vibrations	–	–	1630	796; 668; 473
Образец Al-МБГО / Sample Al-MBGO				
Валентные колебания / Stretching vibrations	3624	–	3437	1046
Деформационные колебания / Deformation vibrations	–	887	1636	796; 620; 513; 466
Образец Fe-МБГО / Sample Fe-MBGO				
Валентные колебания / Stretching vibrations	3605	–	3423	1043
Деформационные колебания / Deformation vibrations	–	875	1634	798; 667; 623; 520; 469

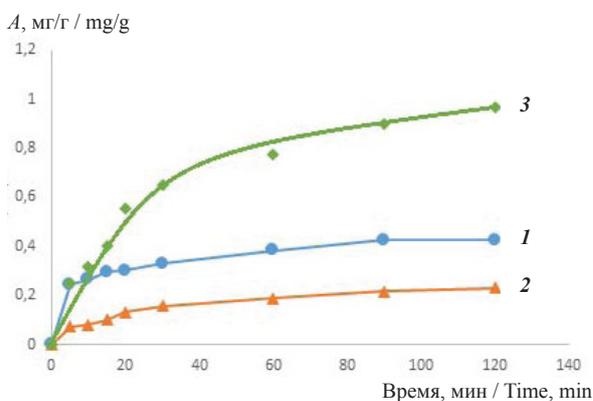


Рис. 2. Кинетические кривые адсорбции крезолового красного из раствора в нейтральной среде на сорбентах: 1 – 1-ГО, 2 – Fe-МБГО и 3 – Al-МБГО

Fig. 2. The kinetic adsorption curves from a solution of cresol red in a neutral medium on sorbents: 1 – 1-GO, 2 – Fe-MBGO and 3 – Al-MBGO

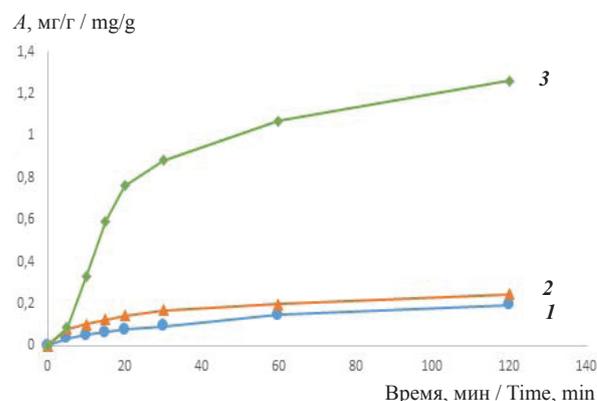


Рис. 3. Кинетические кривые адсорбции метиленового голубого из раствора в нейтральной среде на сорбентах: 1 – 1-ГО, 2 – Fe-МБГО и 3 – Al-МБГО

Fig. 3. The kinetic adsorption curves from a solution of methylene blue in a neutral medium on sorbents: 1 – 1-GO, 2 – Fe-MBGO and 3 – Al-MBGO

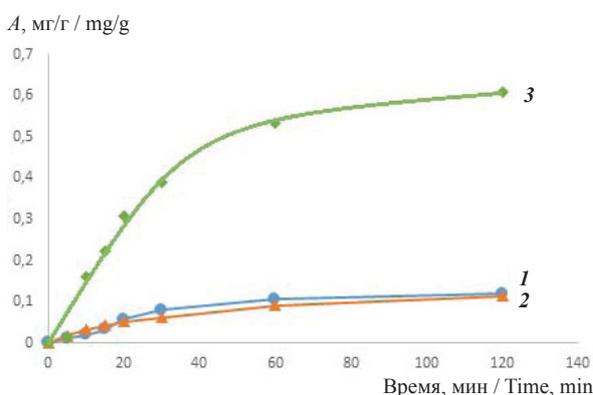


Рис. 4. Кинетические кривые адсорбции конго красного из раствора в нейтральной среде на сорбентах: 1 – 1-ГО, 2 – Fe-МБГО и 3 – Al-МБГО

Fig. 4. The kinetic adsorption curves from the Congo-red solution in a neutral medium on sorbents: 1 – 1-GO, 2 – Fe-MBGO and 3 – Al-MBGO

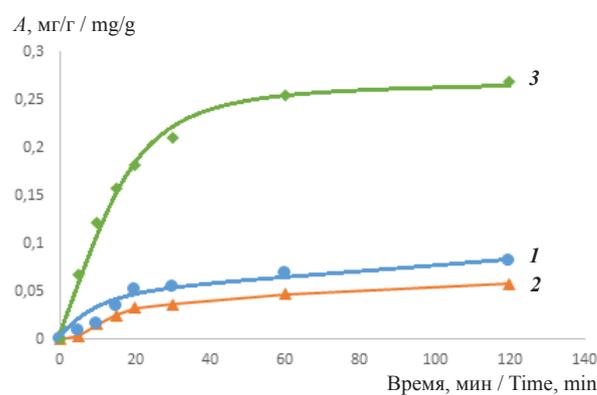


Рис. 5. Кинетические кривые адсорбции метиленового оранжевого из раствора в нейтральной среде на сорбентах: 1 – 1-ГО, 2 – Fe-МБГО и 3 – Al-МБГО

Fig. 5. The kinetic adsorption curves from a solution of methylene orange in a neutral medium on sorbents: 1 – 1-GO, 2 – Fe-MBGO and 3 – Al-MBGO

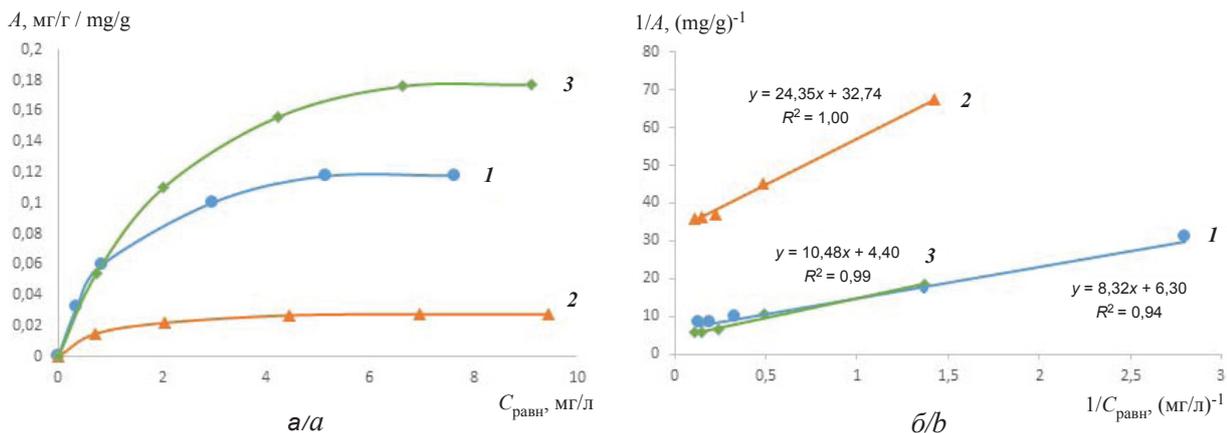


Рис. 6. Изотермы адсорбции крезолового красного в нейтральной среде из раствора на сорбентах: 1 – 1-ГО, 2 – Fe-МБГО и 3 – Al-МБГО (а); изотермы сорбции крезолового красного в нейтральной среде из раствора, представленные в обратных координатах в соответствии с уравнением Ленгмюра, на сорбентах: 1 – 1-ГО, 2 – Fe-МБГО и 3 – Al-МБГО (б)

Fig. 6. Isotherms of adsorption of cresol red in a neutral medium from a solution on sorbents: 1 – 1-GO, 2 – Fe-MBGO and 3 – Al-MBGO (a); isotherms of sorption of cresol red in a neutral medium from a solution, represented in inverse coordinates in accordance with the Langmuir equation, on sorbents: 1 – 1-GO, 2 – Fe-MBGO and 3 – Al-MBGO (b)

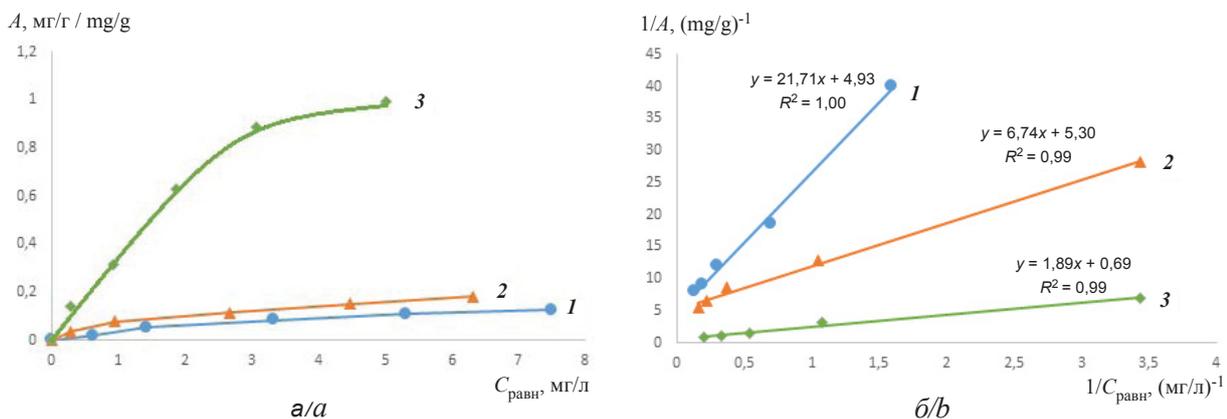


Рис. 7. Изотермы адсорбции метиленового голубого в нейтральной среде из раствора на сорбентах: 1 – 1-ГО, 2 – Fe-МБГО и 3 – Al-МБГО (а); изотермы сорбции метиленового голубого в нейтральной среде из раствора, представленные в обратных координатах в соответствии с уравнением Ленгмюра, на сорбентах: 1 – 1-ГО, 2 – Fe-МБГО и 3 – Al-МБГО (б)

Fig. 7. Isotherms of adsorption of methylene blue in a neutral medium from a solution on sorbents: 1 – 1-GO, 2 – Fe-MBGO and 3 – Al-MBGO (a); isotherms of sorption of methylene blue in a neutral medium from a solution, represented in inverse coordinates in accordance with the Langmuir equation, on sorbents: 1 – 1-GO, 2 – Fe-MBGO and 3 – Al-MBGO (b)

представлений о мономолекулярном характере процесса сорбции, имеет вид (2):

$$A = \frac{A_{\infty} \cdot K \cdot C_p}{1 + K + C_p}, \quad (2)$$

где A_{∞} – предельная мономолекулярная адсорбция, мг/г; C_p – равновесная концентрация, мг/л; K – константа адсорбционного равновесия, л/моль.

Изотерма сорбции Ленгмюра линеаризуется в координатах A^{-1} , C^{-1} (3), что позволяет графоаналитически определить значения коэффициентов K и A_{∞} .

$$\frac{1}{A} = \frac{1}{A_{\infty}} + \frac{1}{A_{\infty} \cdot K} \cdot \frac{1}{C_p}. \quad (3)$$

Обработка полученных изотерм сорбции в соответствии с уравнением Ленгмюра в обратных координатах (3) представлена на рис. 6–9 (б).

Обработка полученных изотерм сорбции позволила оценить величину предельной сорбционной ёмкости исследуемых сорбентов по отношению к исследуемым органическим реагентам. В табл. 4 приведена величина предельной адсорбции органических соединений на исследуемых сорбентах.

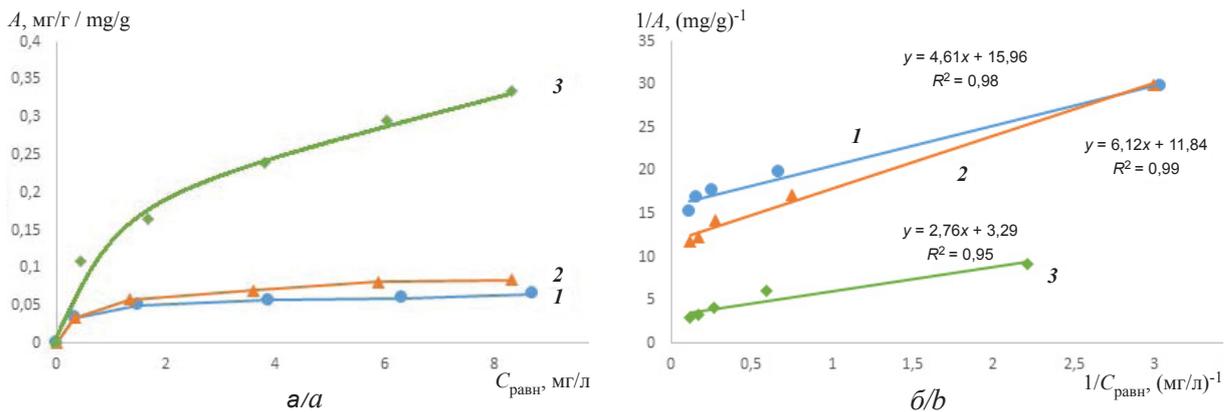


Рис. 8. Изотермы адсорбции конго красного в нейтральной среде из раствора на сорбентах: 1 – 1-ГО, 2 – Fe-МБГО и 3 – Al-МБГО (а); изотермы сорбции конго красного в нейтральной среде из раствора, представленные в обратных координатах в соответствии с уравнением Ленгмюра, на сорбентах: 1 – 1-ГО, 2 – Fe-МБГО и 3 – Al-МБГО (б)
 Fig. 8. Isotherms of adsorption of Congo-red in a neutral medium from a solution on sorbents: 1 – 1-GO, 2 – Fe-MBGO and 3 – Al-MBGO (a); isotherms of sorption of Congo-red in a neutral medium from a solution, represented in inverse coordinates in accordance with the Langmuir equation, on sorbents: 1 – 1-GO, 2 – Fe-MBGO and 3 – Al-MBGO (b)

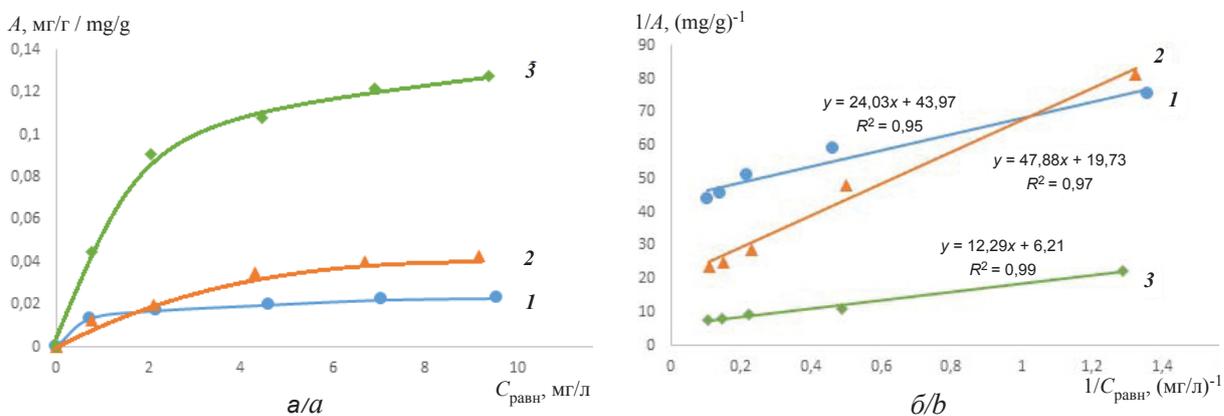


Рис. 9. Изотермы адсорбции метиленового оранжевого в нейтральной среде из раствора на сорбентах: 1 – 1-ГО, 2 – Fe-МБГО и 3 – Al-МБГО (а); изотермы сорбции метиленового оранжевого в нейтральной среде из раствора, представленные в обратных координатах в соответствии с уравнением Ленгмюра, на сорбентах: 1 – 1-ГО, 2 – Fe-МБГО и 3 – Al-МБГО (б)
 Fig. 9. Isotherms of adsorption of methylene orange in a neutral medium from a solution on sorbents: 1 – 1-GO, 2 – Fe-MBGO and 3 – Al-MBGO (a); isotherms of sorption of methylene orange in a neutral medium from a solution, represented in inverse coordinates in accordance with the Langmuir equation, on sorbents: 1 – 1-GO, 2 – Fe-MBGO and 3 – Al-MBGO (b)

Таблица 4 / Table 4

Значения величин предельной адсорбции для органических соединений на исследуемых сорбентах
The values of the maximum adsorption for organic compounds on the studied sorbents

Исследуемый раствор / Test solution	Величина предельной адсорбции, мг/г / Magnitude adsorption limit, mg/g		
	Образец 1-ГО / Sample 1-GO	Образец Fe-МБГО / Sample Fe-MBGO	Образец Al-МБГО / Sample Al-MBGO
Конго красный /Congo-red	0.063	0.084	0.304
Метиленовый голубой / Methylene blue	0.203	0.189	1.453
Крезоловый красный / Cresol red	0.159	0.031	0.227
Метиленовый оранжевый / Methylene orange	0.023	0.051	0.161
Кислотный хром тёмно-синий / Acid chrome dark blue	0.097	0.052	0.307
Эриохром чёрный Т / Eriochrome black T	0.070	0.086	0.083

Термообработка модифицированных бентонитов приводит к образованию жесткой слоисто-столбчатой структуры с наличием щелевидных

микропор, которые недоступны для адсорбции крупных ассоциатов многих органических красителей. Поскольку при модифицировании глин



полигидроксокатионами алюминия и железа(III) изменяется знак заряда поверхности, то наибольшая величина предельной адсорбции наблюдается для органических реагентов катионного типа (метиленовый голубой). Использование модифицированных бентонитов при очистке сточных вод от анионных красителей (конго красный, кислотный хром тёмно-синий, эриохром чёрный Т, метиленовый оранжевый, крезоловый красный) является менее эффективным, поскольку органические анионы адсорбируются только на положительно заряженных боковых гранях бентонитов. Следует отметить, что наибольшую сорбционную активность проявляют Al-модифицированные образцы сорбентов.

Заключение

Изучены физико-химические и сорбционные свойства природного бентонита и модифицированных сорбентов на его основе. Установлено, что модифицирование бентонита полигидроксокатионами железа и алюминия приводит к изменению их химического состава и сорбционных свойств. Происходит увеличение общей площади удельной поверхности (до 104 м²/г), что объясняет повышение сорбции анионов и катионов на модифицированных сорбентах.

Установлено, что величина предельной адсорбции образцов, модифицированных полигидроксокатионами, зависит от природы исследуемых органических реагентов. Наибольшая величина предельной адсорбции наблюдается для органических реагентов катионного типа.

Список литературы

1. Ягубов А. И. Сорбционные процессы очистки сточных вод от метилена голубого на Fe(III) бентоните: экспериментальные исследования и моделирование // Конденсированные среды и межфазные границы. 2007. Т. 9, № 2. С. 177–181.
2. Никитина Нат. В., Комов Д. Н., Казаринов И. А., Никитина Над. В. Физико-химические свойства сорбентов на основе бентонитовых глин, модифицированных полигидроксокатионами железа (III) и алюминия методом «соосаждения» // Сорбционные и хроматографические процессы. 2016. Т. 16, № 2. С. 191–199.
3. Klopogge J. T. Synthesis of Smectites and Porous Pillared Clay Catalyst: Review // *J. of Porous Materials*. 1998. Vol. 5. P. 5–41.
4. Комаров В. С. Адсорбенты. Вопросы теории синтеза и структуры. Минск: Беларуская навука, 1997. 287 с.
5. Khankhasaeva S. Ts., Badmaeva S. V., Dashinamzhilova E. Ts., Bryzgalova L. V., Ryazantsev A. A. Adsorption of Anionic Dyes on Montmorillonite Modified with Polyhydroxo Complexes of Aluminium and Iron // *Chemistry for Sustainable Development*. 2006. Vol. 14. P. 287–294.
6. Никитина Над. В., Казаринов И. А., Никитина Нат. В. Физико-химические свойства сорбентов на основе

природного бентонита // V Междунар. конференция-школа по химической технологии ХТ'16: сб. тез. докл. спутник. конф. XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 3 т. Волгоград: ВолгГТУ, 2016. Т. 3. С. 315–317.

7. Тарасевич Ю. И. Структура и химия поверхности слоистых силикатов. Киев: Наук. думка, 1988. 248 с.
8. Ракитская Т. Л., Кюсе Т. А., Джига А. М., Топоров С. В. ИК-спектральное исследование структуры и фазового состава бентонитов Украины // *Вісник ОНУ. Хімія*. 2012. Т. 17, № 1. С. 13–19.
9. Вакалова Т. В. Глины. Особенности структуры и методы исследования. Томск: ТГУ, 1998. 121 с.

References

1. Yagubov A. I. Sorption processes of sewage treatment from methylene blue on Fe (III) bentonite: experimental researches and modeling. *Condensed Matter and Interphases*, 2007, vol. 9, no. 2, pp. 177–181 (in Russian).
2. Nikitina Nat. V., Komov D. N., Kazarinov I. A., Nikitina Nad. V. Physical and chemical properties of sorbents based on bentonite clay, modified with iron (III) and aluminum polyhydroxocations by the «coprecipitation». *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 191–199 (in Russian).
3. Klopogge J. T. Synthesis of Smectites and Porous Pillared Clay Catalyst: Review. *J. of Porous Materials*, 1998, vol. 5, pp. 5–41.
4. Komarov V. S. *Adsorbenty. Voprosy teorii sinteza i struktury* [The adsorbents. Questions of the theory of synthesis and structure]. Minsk, Belorusskaya navuka Publ., 1997. 287 p. (in Russian).
5. Khankhasaeva S. Ts., Badmaeva S. V., Dashinamzhilova E. Ts., Bryzgalova L. V., Ryazantsev A. A. Adsorption of Anionic Dyes on Montmorillonite Modified with Polyhydroxo Complexes of Aluminium and Iron. *Chemistry for Sustainable Development*, 2006, vol. 14, pp. 287–294.
6. Nikitina Nad. V., Kazarinov I. A., Nikitina Nat. V. Fiziko-himicheskie svoystva sorbentov na osnove prirodnoho bentonite [Physical and chemical properties of sorbents based on natural bentonites]. *V Mezhdunarodnaya konferentsiya-shkola po himicheskoi tekhnologii HT'16: sb. tezisov dokladov satellitnoi konferentsii XX Mendeleevskogo s'ezda po obshchej i prikladnoj khimii: v 3 t.* [V International Conference-Schools of Chemical Technology CT'16: collection of abstracts of the satellite conference of the XX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry: in 3 vols.]. Volgograd, VolgGTU, 2016, vol. 3, pp. 315–317 (in Russian).
7. Tarasevich Yu. I. *Stroenie i khimiya poverkhnosti sloistykh silikatov* [Structure and surface chemistry of layered silicates]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1988. 248 p. (in Russian).
8. Rakitskaya T. L., Kiose T. A., Dzhiga A. M., Toporov S. V. IR spectral study of structures and phase compositions of Ukrainian bentonites. *Odesa National University Herald. Chemistry*, 2012, vol. 17, no. 1, pp. 13–19 (in Russian).
9. Vakalova T. V. *Gliny. Osobennosti struktury i metody issledovaniya* [Features of the structure and methods of research]. Tomsk, TGU, 1998. 121 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 28.10.2020, после рецензирования 17.11.2020, принята к публикации 20.11.2020
Received 28.10.2020, revised 17.11.2020, accepted 20.11.2020