



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2021. Т. 21, вып. 2. С. 152–158  
*Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2021, vol. 21, iss. 2, pp. 152–158

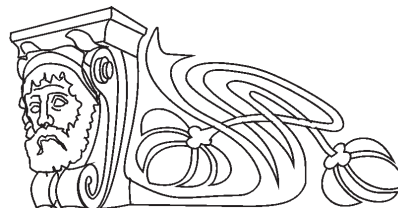
Научная статья

УДК 544.723:547.3

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2021-21-2-152-158>

## Глауконит как сорбент 4-нитрофенола

Т. М. Махова<sup>✉</sup>, С. Ю. Доронин



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

Махова Татьяна Михайловна, аспирант кафедры аналитической химии и химической экологии Института химии, [tatianaahrimova@mail.ru](mailto:tatianaahrimova@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1896-6175>

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

**Аннотация.** Исследована сорбционная способность глауконита Саратовской области (Белозерское месторождение) по отношению к 4-нитрофенолу (4-НФ). Оценено влияние глауконита на pH и состояние 4-нитрофенола в растворе. Показано, что глауконит увеличивает pH водных сред до 8 и смещает равновесие в сторону образования аци-формы 4-НФ. Установлены условия сорбции 4-НФ глауконитом: время сорбции 20 мин, масса сорбента (0,50–1,0) г. Получена изотерма сорбции 4-НФ глауконитом с учетом кинетики установления равновесия. Дана её интерпретация с применением уравнений Ленгмюра и Фрейндлиха. Рассчитаны основные количественные характеристики сорбции 4-НФ глауконитом: степень извлечения ( $R = 64\%$ ), коэффициент распределения ( $D = 88$ ), константы Ленгмюра и Фрейндлиха. Проведенные эксперименты позволили сделать вывод о потенциальной возможности применения глауконита Белозерского месторождения Саратовской области для извлечения 4-НФ из различных вод.

**Ключевые слова:** неорганические сорбенты, глауконит, сорбция, 4-нитрофенол

**Для цитирования:** 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>

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

Article

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2021-21-2-152-158>

### Glauconite as a sorbent of 4-nitrophenol

T. M. Makhova<sup>✉</sup>, S. Yu. Doronin

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

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

Sergei Yu. Doronin, [doroninsu@mail.ru](mailto:doroninsu@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1115-1360>

**Abstract.** The sorption properties of glauconite from Beloozersk deposits (Saratov region) for 4-nitrophenol (4-NF) have been investigated. The effect of glauconite on pH and 4-nitrophenol structure in solution is estimated. It is shown that glauconite increases pH of aqueous environment to 8 and shifts the equilibrium towards the formation of aci-form 4-NF. The conditions of sorption 4-NF by glauconite are established: the sorption time 20 min, the mass of the sorbent (0.50–1.0) g. The isotherm of sorption by 4-NF glauconite has been obtained; its interpretation is given using the Langmuir and Freundlich equations. The main quantitative sorption characteristics of glauconite such as recovery ( $R = 64\%$ ), distribution coefficient ( $D = 88$ ) and the Langmuir and Freundlich constants for 4-nitrophenol are calculated. These experiments indicate the potential use of the glauconite from Beloozersk deposits (Saratov region) for 4-NP from various waters.

**Keywords:** inorganic sorbents, glauconite, sorption, 4-nitrophenol

**For citation:** 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. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2021-21-2-152-158>

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

### Введение

Нитрофенолы (НФ) широко применяются в нефтехимической, фармацевтической отраслях промышленности, при производстве красителей, пестицидов, кожи и др. Они токсичны (ПДК в пи-

тьевой воде – 0,02 мг/л) и канцерогенны, обладают биоаккумулятивностью и устойчивостью в окружающей среде (ОС). Европейское агентство по охране ОС относит 4-нитрофенол (4-НФ) к приоритетным загрязнителям объектов ОС, в частности вод [1].



Актуальной аналитической задачей является определение НФ в различных водах на уровне долей ПДК. Для решения указанной задачи могут быть применены различные по природе сорбенты с целью предварительного сорбционного концентрирования нитрофенолов, например, глинистые минералы (бентонит, монтмориллонит, глауконит), углеродные сорбенты, полимерные матрицы и др. [2]. Повышенный интерес к ним объясняется их адсорбционными и структурными характеристиками (удельная площадь поверхности, большой объем микропор, широкий спектр поверхностных функциональных групп).

В табл. 1 приведены данные по сорбции 4-НФ некоторыми природными сорбентами на основе глинистых минералов за последние 5 лет.

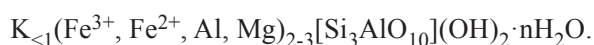
К числу глинистых минералов-сорбентов относят цеолиты, которые имеют широкую распространённость и низкую себестоимость. Поскольку сорбционная способность цеолита по отношению к 4-НФ ограничена из-за структурных особенностей минерала, авторами [3] была предложена методика его модификации с помощью катионных ПАВ, в частности  $\beta$ -циклодестрином. Результаты исследования показали, что сорбционная емкость модифицированного цеолита выше, чем у исходного в 8 раз.

В последние годы ученые проявляют интерес к синтезу нанокристаллических цеолитов для очистки вод от органических токсикантов. Так, в работе [4] была оценена целесообразность использования Fe-наноцеолита для удаления 4-НФ из сточных вод. Максимальная сорбционная емкость по отношению к 4-НФ составила 223 мг/г. Таким образом, наноцеолит, обладая высокой сорбционной способностью, может быть использован как эффективный и экономичный сорбент для очистки сточных вод от нитрофенолов.

В работе [6] изучена возможность применения бентонита в качестве недорогого сорбента для извлечения 4-НФ из загрязнённых вод. Установлено, что изотермы его сорбции хорошо описываются классическим уравнением Ленгмюра, максимальная сорбционная емкость составила 284 мг/г. При этом повышение температуры и увеличение pH больше, чем  $pK_a$  (для 4-НФ  $pK_a = 7,15$ ) отрицательно влияли на адсорбционную способность бентонита по отношению к 4-нитрофенолу. Это связано с формированием электростатического отталкивания между отрицательно заряженной поверхностью бентонита и частично отрицательным зарядом 4-НФ.

Одним из широко распространённых минералов, применяемых в качестве природного

сорбента по отношению к ряду органических соединений, является также глауконит – водный алюмосиликат железа, кремнезема и оксида калия переменного состава общей формулы:



В настоящей работе в качестве сорбента применяли глауконит Белозерского месторождения Саратовской области, основными преимуществами которого являются нанопористость, экологическая безопасность, а также невысокая себестоимость. Сорбционная способность этого сорбента по отношению к 4-НФ ранее не изучалась. Однако известны работы по эффективному его применению для сорбции как ионов металлов [12], так и ряда органических соединений, например, лекарственного ряда [13]. Поэтому целью настоящей работы явилось исследование сорбционных свойств глауконита Белозерского месторождения Саратовской области по отношению к 4-нитрофенолу.

#### Экспериментальная часть

Для исследования сорбционных свойств глауконита применяли фракцию глауконитового песка Белозерского месторождения Саратовской области (200–500 мкм) с содержанием глауконита до 85% [12].

Для изучения кинетики сорбции 4-НФ в статическом режиме навеску глауконита (0,50–1,0) г помещали в конические колбы, вместимостью 100 мл, добавляли по (25–50) мл раствора 4-НФ с концентрациями от 20 до 100 мг/л; перемешивали на шейкере до установления сорбционного равновесия. После глауконит отфильтровывали и определяли концентрацию 4-НФ спектрофотометрически: отбирали 5 мл остаточного раствора, добавляли 1 мл раствора аммиака (5 мас. %) и через 5 мин измеряли оптическую плотность полученного раствора на спектрофотометре UV 1800 (Shimadzu, Япония) при  $\lambda_{max}$  400 нм [14].

Расчет степени извлечения ( $R$ , %), коэффициента распределения ( $D$ ), значения предельной сорбции ( $OE_p$ , мг/г) осуществляли по уравнениям:

$$R = 100 \cdot (c_0 - c)/c_0,$$

$$D = R \cdot V / [(100 - R) \cdot m],$$

$$OE_p = [(c_0 - c) \cdot V] / m,$$

где  $c_0$  и  $c$  – концентрации 4-НФ в исходном растворе до и после сорбции соответственно, мг/л;  $V$  – объем водного раствора, л;  $m$  – масса сорбента, г.



Таблица 1 / Table 1

**Данные о сорбции 4-НФ природными сорбентами**  
**Data on the sorption of 4-NP by natural sorbents**

№ / No.	Сорбент / Sorbent	Условия сорбции / Sorption conditions	Некоторые метрологические характеристики / Some metrological characteristics	Лит-ра / Referens
1	Цеолит, модифицированный β-циклодестрином / Zeolite modified by β-cyclodextrin	$m = 0,5$ g; $C$ (4-NP) = 100 mg/l; 6% NaOH; $t = 25$ min; pH = 3,5–4	CE – 800 мкг/г; без модификации (50 мкг/г) / SC – 800 mkg/g; without modification (50 mkg/g)	[3]
2	Fe-наноцеолит $S_{удел} = 987$ м <sup>2</sup> /г / Fe-nanozeolite $S_{BET} = 987$ м <sup>2</sup> /г	$m = 0,5$ g; $C = 10$ –500 mg/l; $t = 180$ min; pH = 5	CE – 223 мг/г; $R = 92,5\%$ / SC – 223 mg/g; $R = 92,5\%$	[4]
3	Наноцеолит $S_{удел} = 698$ м <sup>2</sup> /г / Nanozeolite $S_{BET} = 698$ м <sup>2</sup> /г	$m = 0,6$ g; $C = 10$ –500 mg/l; $t = 150$ min; pH = 6	CE – 156,7 мг/г; $R = 70\%$ / SC – 156,7 mg/g; $R = 70\%$	[5]
4	Бентонит / Bentonite	$C = 50$ mg/l; $t = 180$ min; pH = 6	CE – 284 мг/г; $R = 98\%$ / SC – 284 mg/g; $R = 98\%$	[6]
5	Каолинит $S_{удел} = 20,6$ м <sup>2</sup> /г / Kaolinitic clay $S_{BET} = 20,6$ м <sup>2</sup> /г	$m = 0,2$ g; $C = 50$ mg/l; $t = 120$ min; pH = 8	CE – 3,74 мг/г; $R = 58,7\%$ / SC – 3,74 mg/g; $R = 58,7\%$	[7]
6	ММТ, модифицированный N-оксид 4-метил-морфолином и N-оксид диметил-додециламином $S_{удел} = 245$ м <sup>2</sup> /г / MMT, modified by N- 4-methyl-morpholine oxide and dimethyl-dodecylamine N-oxide $S_{BET} = 245$ м <sup>2</sup> /г	$m = 0,3$ g; $C = 5$ –25 mg/l; $t = 24$ h; pH = 7	Увеличение CE до 30 раз / Increase SC up to 30 times	[8]
7	Композит на основе ММТ, АУ и цемента $S_{удел} = 140$ м <sup>2</sup> /г / Composite based on MMT, AC and cement $S_{BET} = 140$ м <sup>2</sup> /г	$C = 0,72$ mmol/l; $t = 120$ min; pH = 3	CE – 0,28 ммоль/г / SC – 0,28 mmol/g	[9]
8	Геокомпозит на основе Al-ММТ и АУ / Geocomposite based on Al-MMT and AC	$m = 0,1$ g; $C = 20$ mg/l; $t = 24$ h; pH = 3	$R = 72\%$	[10]
9	ММТ, модифицированный ЦТАБ $S_{удел} = 15$ м <sup>2</sup> /г / MMT modified by СТАВ $S_{BET} = 15$ м <sup>2</sup> /г	$m = 0,1$ g; $C = 50$ mg/l; $t = 15$ min; pH = 5–6,5	CE – 3,74 мг/г; $R = 79,1\%$ / SC – 3,74 mg/g; $R = 79,1\%$	[11]

Примечание.  $C_0$  – исходная концентрация аналита;  $R$  – степень извлечения;  $S_{удел}$  – удельная площадь поверхности; АУ – активированный уголь; ЦТАБ – цетилтриметиламмоний бромид; ММТ – монтмориллонит; CE – сорбционная емкость.

Note.  $C$  – initial 4-NP concentration;  $R$  – recovery rate;  $S_{BET}$  – specific surface area; AC – activated carbon; СТАВ – cetyltrimethylammonium bromide; ММТ – montmorillonite; SC – sorption capacity.



### Результаты и их обсуждение

Предварительно изучено влияние глауконита на рН растворов 4-НФ. Так, 4-нитрофенол может находиться в растворе как в форме А, так и в аци-форме Б. При образовании аци-формы атом водорода из фенольного гидроксила переходит к атому кислорода в нитрогруппе (рис. 1).

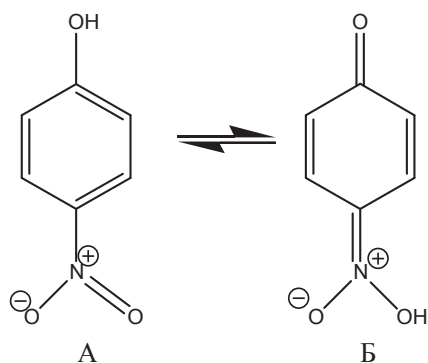


Рис. 1. Взаимные превращения двух таутомерных форм 4-нитрофенола

Fig. 1. Chemical structure of 4-nitrophenol in acidic and alkaline aqueous environment

Полученные спектры (рис. 2) демонстрируют, что в нейтральной среде (при разбавлении 4-НФ водой) равновесие реакции смещено в сторону формы А (см. рис. 2), и они характеризуются одним максимумом поглощения при  $\lambda_{\max} = 317$  нм. В спектрах поглощения 4-НФ в водной вытяжке глауконита (навеска глауконита 0,50 г, растворенная в 25 мл дистиллированной воды) появляется максимум поглощения при

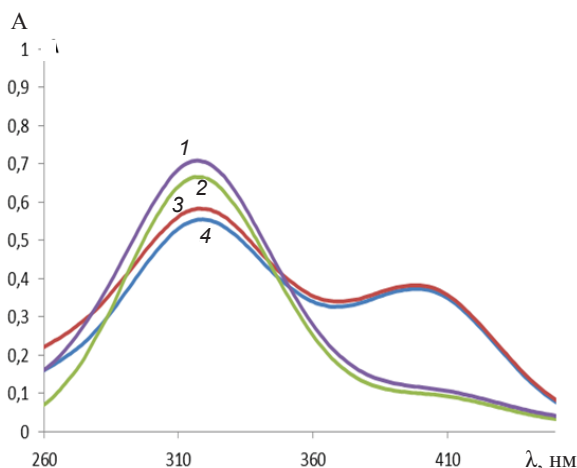


Рис. 2. Спектры поглощения 4-НФ в: 1, 2 – воде, 3, 4 – водной вытяжке глауконита

Fig. 2. Absorption spectra of 4-NP in: 1, 2 – water, 3, 4 – aqueous extract of glauconite

400 нм, характерный для аци-формы Б. Поскольку глауконит содержит силанольные группы и проявляет свойства слабого основания, это и приводит к формированию слабощелочной среды, смещая при этом равновесие (см. рис. 1) в сторону образования аци-формы Б.

Для некоторых аналогов (природных алюмосиликатов) рекомендуют противоречивые данные по оптимальным значениям рН в диапазоне от 3 до 8 [3, 6–8]. Согласно [3, 9, 10, 14] для некоторых твердофазных сорбентов оптимальным рН для сорбции 4-НФ является рН~3, что обусловлено сорбцией нитрофенола преимущественно в молекулярной форме, поэтому для таких систем необходимо подкисление исходного раствора.

Учитывая вышесказанное, в настоящей работе сорбцию 4-НФ глауконитом проводили при рН = 3, для этого в водную суспензию глауконита добавляли раствор 0,01 М раствор HCl до рН = 3 и контролировали в течение 10–30 мин, чтобы значение рН оставалось неизменным.

На рис. 3 приведена кинетическая кривая сорбции 4-НФ глауконитом из 100 мл раствора с исходной концентрацией нитрофенола 100 мг/л, из которой видно, что равновесное значение сорбции достигается в течение 20 мин.

Для расчёта физико-химических параметров сорбции получена изотерма сорбции 4-НФ глауконитом в диапазоне концентраций 20–100 мг/л (рис. 4) в следующих условиях: время сорбции 20 мин, масса сорбента 0,50 г, рН ~ 3,0.

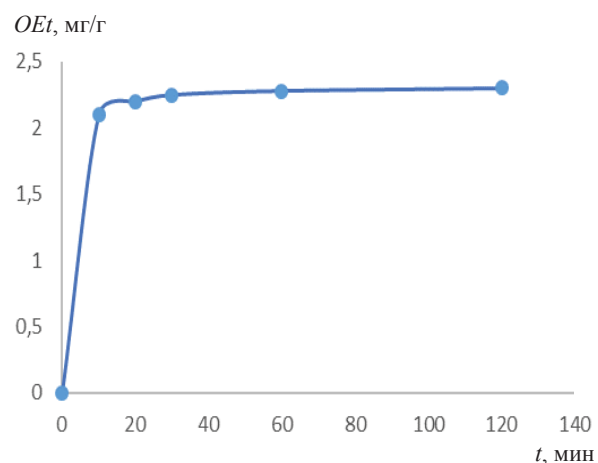


Рис. 3. Кинетическая кривая сорбции 4-НФ (100 мг/л) на глауконите (0,50 г)

Fig. 3. Kinetic curves of 4-NP sorption (100 mg/l) on glauconite (0,50 g)

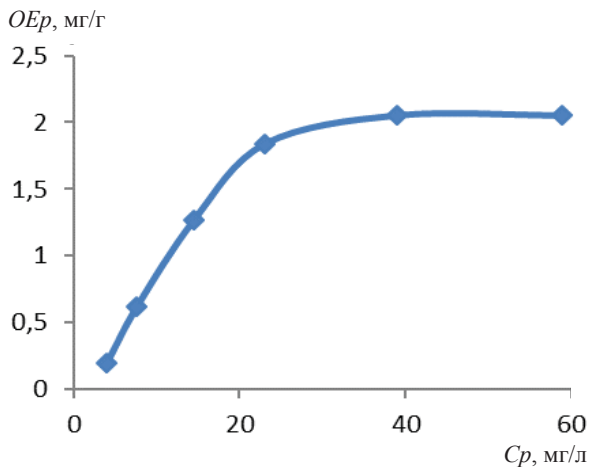


Рис. 4. Зависимость сорбционной емкости глауконита от концентрации 4-НФ  
 Fig. 4. Dependence of the sorption capacity of glauconite on the concentration of 4-NP

Изотерму сорбции 4-НФ характеризовали уравнениями Лэнгмюра (1) и Фрейндлиха (2):

$$Q = Q_{\infty} \cdot \frac{K_L \cdot C_{\text{равн}}}{K_L \cdot C_{\text{равн}} + 1}, \quad (1)$$

$$Q = K_{\phi} \cdot C_{\text{равн}}^{1/n}, \quad (2)$$

где  $Q$  и  $Q_{\infty}$  – удельная и предельная сорбция соответственно, моль/г;  $C_{\text{равн}}$  – равновесная концентрация сорбата, моль/л;  $K$ ,  $n$  – эмпирические константы уравнений.

Для выбора модели сорбции, наиболее полно описывающей изучаемый процесс, проводили линеаризацию зависимостей (3), (4):

$$\frac{C_{\text{равн}}}{Q} = \frac{1}{Q_{\infty} \cdot C_{\text{равн}}} + \frac{1}{Q_{\infty}} \cdot \frac{1}{C_{\text{равн}}}, \quad (3)$$

$$\lg Q = \lg K_{\phi} + \frac{1}{n} \cdot \lg C_{\text{равн}}. \quad (4)$$

Наибольшие коэффициенты корреляции ( $r^2$  0,990–0,999) установлены для изотермы сорбции в координатах уравнения Ленгмюра, они применимы для описания начального участка изотермы сорбции 4-НА глауконитом. Линейный участок изотермы позволяет графически установить постоянные параметры изотермы Лэнгмюра ( $Q_{\infty}$  и  $K_L$ ). Экстраполяция изотермы (рис. 5) на ось ординат отсекает отрезок, равный  $1/Q_{\infty} \cdot K_L$ , а тангенс угла наклона прямой равен  $1/Q_{\infty}$ .

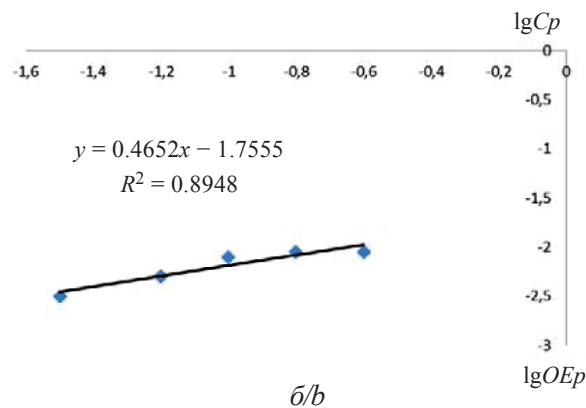
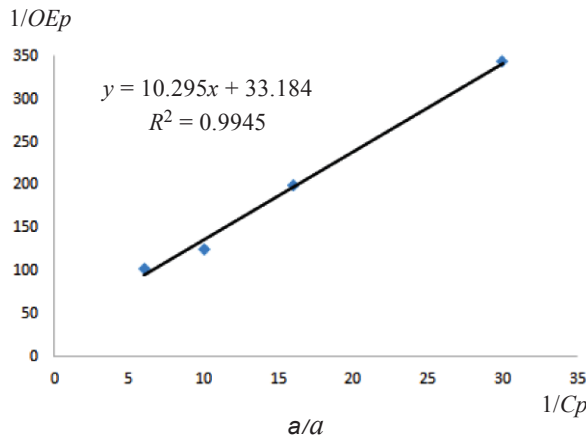


Рис. 5. Изотермы сорбции 4-НФ глауконитом в линейных координатах (а) Лэнгмюра и (б) Фрейндлиха  
 Fig. 5. The isotherm of sorption by 4-NP glauconite in linear coordinates (a) Langmuir and (b) Freundlich

Рассчитанные значения предельной сорбции ( $Q_{\infty}$ ), константы сорбционного равновесия ( $K_L$ ), эмпирические константы ( $K_{\phi}$  и  $n$ ), а также количественные характеристики сорбции 4-НФ глауконитом приведены в в табл. 2, 3 соответственно.

Таблица 2 / Table 2

**Рассчитанные константы уравнений Фрейндлиха и Ленгмюра  
 Calculated constants of the Freundlich and Langmuir equation**

Тип изотермы / Isotherm type	Сорбционные характеристики / Sorption characteristics		
	$Q_{\infty}$	$K_L$	$r^2$
Лэнгмюра / Langmuir	0,02	5,38	0,99
	$K_{\phi}$	$1/n$	$r^2$
Фрейндлиха / Freundlich	43,6	0,56	0,89





Таблица 3 / Table 3

Некоторые характеристики сорбции  
4-НФ глауконитом

## Some characteristics of sorption by 4-NP glauconite

$C_0$ , мг/л (mg/l)	$D$	$OE_p$ , мг/г (SC, mg/g)	$R$ , %
20	81,6	0,62	62,0
40	87,9	1,27	63,7
60	79,9	1,84	61,5
80	52,6	2,05	51,3
100	34,9	2,05	41,1

Как видно из табл. 3, при увеличении исходной концентрации 4-НФ ( $C_0$ ) степень извлечения его уменьшается, однако максимальное значение степени извлечения достигает при концентрации 4-НФ 20 мг/л и составляет в среднем ~63%, коэффициент распределения составил – 81,6, что сопоставимо с литературными данными по степени извлечения 4-нитрофенола (от 58 до 98%) природными сорбентами, такими как бентонит, каолинит, монтмориллонит [6, 7, 11].

Таким образом, можно сделать вывод о потенциальной возможности применения глауконита Белозерского месторождения для извлечения 4-НФ и его производных из различных природных вод, что требует, однако, дальнейшей оптимизации условий сорбции, связанных с применением буферных систем различной природы в более широком диапазоне pH и др.

**Выводы**

1. Установлено, что 4-нитрофенол можно извлекать в указанных условиях (время контакта сорбента и модельных растворов сорбата составило (15–20) мин, pH ~3) в зависимости от исходной его концентрации со степенью извлечения от 41 до 64%, максимальное значение коэффициента распределения – 89.

2. Спектрофотометрически установлены величины сорбционных емкостей глауконита по отношению к 4-нитрофенолу в интервале концентраций 20–100 мг/л. Величина предельной сорбции 4-нитрофенола составила 2,2 мг/г.

3. Построены изотермы сорбции 4-нитрофенола глауконитом в статических условиях. Дана их интерпретация и показано, что они описываются классическим уравнением Ленгмюра.

**Список литературы**

1. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological profile for Nitrophenols: 2-Nitrophenol and 4-Nitrophenol. URL: <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp50.pdf> (дата обращения: 23.06.2020).
2. Baudu M., Basly J., Kankou M. Copper and nitrophenol pollutants removal by Na montmorillonite/ alginate microcapsules // J. of Hazardous Materials. 2009. Vol. 171. P. 405–409. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.06.015
3. Li X., Hao X., Zhao B. Preparation of modified zeolites by  $\beta$ -cyclodextrin and its sorption performance of p-nitrophenol // International Conference on Physics, Computing and Mathematical Modeling. 2018. P. 484–488. DOI: 10.12783/dtscse/pcmm2018/23708
4. Huong P., Lee B., Kim J., Lee C. Nitrophenols removal from aqueous medium using Fe-nano mesoporous zeolite // Materials and Design. 2016. Vol. 101. P. 210–217. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.04.020
5. Huong P., Lee B., Kim J. Improved adsorption properties of a nano zeolite adsorbent toward toxic nitrophenols // Process Safety and Environment Protection. 2016. DOI: 10.1016/j.psep.2016.08.018
6. Zbair M., Anfar Z., Ahsaine H. Reusable bentonite clay: modelling and optimization of hazardous lead and p-nitrophenol adsorption using a response surface methodology approach // The Royal Society of Chemistry. 2019. Vol. 9. P. 5756–5769. DOI: 10.1016/j.psep.2016.08.018
7. Azeez S., Adekola F. Kinetics and thermodynamics of sorption of 4-nitrophenol on activated kaolinitic clay and jatropha curcas activated carbon from aqueous solution // Pak. J. Anal. Environ. Chem. 2016. Vol. 17, iss. 1. P. 93–105. DOI: 10.21743/pjaec/2016.06.014
8. Ozola R., Krauklis A., Burlakovs J., Klavins M., Vincevica-Gaile Z., Hogland W. Surfactant-modified clay sorbents for the removal of p-nitrophenol // Clays and Clay Minerals. 2019. Vol. 67, iss. 2. P.132–142. DOI: 10.1007/s42860-019-00015-2
9. Houari M., Hamdi B., Bouras O., Bollinger J., Baudu M. Static sorption of phenol and 4-nitrophenol onto composite geomaterials based on montmorillonite, activated carbon and cement // Chemical Engineering J. 2014. Vol. 255. P. 506–512. DOI: 10.1016/j.cej.2014.06.065
10. Hamidouche S., Bouras O., Zermane F., Cheknane B., Houari M., Debord J., Harel M., Bolinger J., Baudu M. Simultaneous sorption of 4-nitrophenol and 2-nitrophenol on a hybrid geocomposite based on surfactant-modified pillared-clay and activated carbon // Chemical Engineering J. 2015. Vol. 279. P. 964–972. DOI: 10.1016/j.cej.2015.05.012
11. Santos A., Viante M., Pochapski D., Downs A., Almeida C. Enhanced removal of p-nitrophenol from aqueous media by montmorillonite clay modified with a cationic surfactant // J. of Hazardous Materials. 2018. Vol. 351. P. 136–144. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.02.041



12. Солдатенко Е. М., Доронин С. Ю., Чернова Р. К., Махова Т. М. Сорбционные свойства антибактериального композита глауконита и наночастиц меди // Сорбционные и хроматографические процессы. 2017. Т. 17, № 3. С. 443–450. DOI: 10.17308/sorpchrom.2017.17/399
13. Наумова Г. Н., Селифонова Е. И., Чернова Р. К., Вениг С. Б., Сержантов В. Г., Захаревич А. М. О кинетике и механизме сорбции тетрациклина глауконитом // Сорбционные и хроматографические процессы. 2017. Т. 17, № 1. С. 141–147.
14. Суханов П. Т., Кушнир А. А., Бондарева Л. П., Чурилина Е. В., Богдаев А. А., Шаталов Г. В. Кинетика сорбции 4-нитрофенола полимерными сорбентами на основе N-винилпирролидона // Сорбционные и хроматографические процессы. 2015. Т. 15, № 2. С. 234–242.
7. Azeez S., Adekola F. Kinetics and thermodynamics of sorption of 4-nitrophenol on activated kaolinitic clay and jatropa curcas activated carbon from aqueous solution. *Pak. J. Anal. Environ. Chem.*, 2016, vol. 17, iss. 1, pp. 93–105. DOI: 10.21743/pjaec/2016.06.014
8. Ozola R., Krauklis A., Burlakovs J., Klavins M., Vincevica-Gailel Z., Hogland W. Surfactant-modified clay sorbents for the removal of p-nitrophenol. *Clays and Clay Minerals*, 2019, vol. 67, iss. 2, pp.132–142. DOI: 10.1007/s42860-019-00015-2
9. Houari M., Hamdi B., Bouras O., Bollinger J., Baudu M. Static sorption of phenol and 4-nitrophenol onto composite geomaterials based on montmorillonite, activated carbon and cement. *Chemical Engineering J.*, 2014, vol. 255, pp. 506–512. DOI: 10.1016/j.cej.2014.06.065
10. Hamidouche S., Bouras O., Zermane F., Cheknane B., Houari M., Debord J., Harel M., Bolinger J., Baudu M. Simultaneous sorption of 4-nitrophenol and 2-nitrophenol on a hybrid geocomposite based on surfactant-modified pillared-clay and activated carbon. *Chemical Engineering J.*, 2015, vol. 279, pp. 964–972. DOI: 10.1016/j.cej.2015.05.012
11. Santos A., Viante M., Pochapski D., Downs A., Almeida C. Enhanced removal of p-nitrophenol from aqueous media by montmorillonite clay modified with a cationic surfactant. *J. of Hazardous Materials*, 2018, vol. 351, pp. 136–144. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.02.041
12. Soldatenko E. M., Doronin S. Yu., Chernova R. K., Makhova T. M. Sorption properties of the antibacterial composite glauconite and copper nanoparticles. *Sorption and Chromatography Processes*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 443–450 (in Russian). DOI: 10.17308/sorpchrom.2017.17/399
13. Naumova G. N., Selifonova E. I., Chernova R. K., Venig S. B., Serzhantov V. G., Zakharevich A. M. About the kinetics and mechanisms of sorption of tetracycline glauconite. *Sorption and Chromatography Processes*, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 141–147 (in Russian).
14. Sukhanov P. T., Kushnir A. A., Bondareva L. P., Churilina E. V., Bogdaev A. A., Shatalov G. V. Kinetics of sorption of 4-nitrophenol polymeric sorbents based on N-vinylpyrrolidone. *Sorption and Chromatography Processes*, 2015, vol. 15, no. 2, pp. 234–242 (in Russian).

## References

1. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). *Toxicological profile for Nitrophenols: 2-Nitrophenol and 4-Nitrophenol*. Available at: <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp50.pdf> (accessed 23 June 2020).
2. Baudu M., Basly J., Kankou M. Copper and nitrophenol pollutants removal by Na montmorillonite/ alginate microcapsules. *J. of Hazardous Materials*, 2009, vol. 171, pp. 405–409. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.06.015
3. Li X., Hao X., Zhao B. Preparation of modified zeolites by  $\beta$ -cyclodextrin and its sorption performance of p-nitrophenol. *International Conference on Physics, Computing and Mathematical Modeling*, 2018, pp. 484–488. DOI: 10.12783/dtce/pcmm2018/23708
4. Huong P., Lee B., Kim J., Lee C. Nitrophenols removal from aqueous medium using Fe-nano mesoporous zeolite. *Materials and Design*, 2016, vol. 101, pp. 210–217. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.04.020
5. Huong P., Lee B., Kim J. Improved adsorption properties of a nano zeolite adsorbent toward toxic nitrophenols. *Process Safety and Environment Protection*, 2016. DOI: 10.1016/j.psep.2016.08.018
6. Zbair M., Anfar Z., Ahsaine H. Reusable bentonite clay: modelling and optimization of hazardous lead and p-nitrophenol adsorption using a response surface

Поступила в редакцию 14.01.21, после рецензирования 26.01.21, принята к публикации 08.02.21  
Received 14.01.21, revised 26.01.21, accepted 08.02.21