

УДК 552.513.4.08

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОРБЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЛАУКОНИТА ПРИ ИЗВЛЕЧЕНИИ ФАРМАЦЕВТИЧЕСКОГО ПРЕПАРАТА ИЗ ВОДНЫХ СРЕД

С.Б. Вениг, Р.К. Чернова, В.Г. Сержантов, В.П. Сплюхин, М.А. Переспелова,  
Е.И. Селифонова\*, Г.Н. Наумова, А.М. Захаревич, А.А. Селифонов,  
И.О. Кожевников, Н.Н. Щербакова

*(Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
им. Н.Г. Чернышевского; \*e-mail: selif-ei@yandex.ru)*

Разработан способ получения обогащенной фракции глауконитового сорбента на основе природного минерала Белоозёрского месторождения Саратовской области. Приведены результаты изучения химического состава, структуры поверхности и некоторых физико-химических свойств образцов сорбента. Проведено исследование процесса сорбции ионов амброксола гидрохлорида из водных растворов природным и обогащенным глауконитом. Получены изотермы сорбции, которые аппроксимируются уравнением Лэнгмюра, и рассчитаны значения максимальных сорбционных емкостей. На основании полученных данных сделаны выводы о возможности использования изученных природных минеральных сорбентов для извлечения вышеуказанного вещества из водных растворов.

**Ключевые слова:** глауконит, сорбция, изотермы, амброксола гидрохлорид, пористость, очистка воды.

Для очистки сточных вод большой интерес представляют природные сорбенты, к которым относится глауконит. Существенными достоинствами этого минерала являются: широкое распространение, дешевизна, доступность, зернистая структура, термостойкость, хорошие ионообменные и фильтрационные свойства, а также возможность путем химического и структурного модифицирования направленно изменять технологические показатели минерала. Глауконит – широко распространенный в природе минерал, общие ресурсы, которого оцениваются в 35,7 млрд т. В России и бывших союзных республиках широко распространены породы, содержащие глауконит [1]. Глаукониты разных месторождений имеют разный химический состав и разные сорбционные и ионообменные свойства. Большое число работ посвящено изучению сорбционных свойств глауконита Бондарского месторождения Тамбовской области. Показано, что данный минерал является полифункциональным сорбентом, эффективно извлекающим из водных растворов анилин [2], фенол [3,4], катионы тяжелых металлов  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  [5,6], катионы магния (II), кальция (II) [7, 8]. В работе [9] описан сорбционный метод очистки водных объектов от техногенных радионуклидов с использованием гранулированного глауконита. Авторами [10] были изучены осо-

бенности структуры и сорбционные свойства глауконита Каринского месторождения.

Одним из самых перспективных в Российской Федерации по мощности и концентрации основного продукта считается Белоозёрское месторождение, расположенное в Саратовской области (1,5 км восточнее с. Белое Озеро Лысогорского р-на). Запасы по категориям А+В+С<sub>1</sub> составляют 5,5 млн т при содержании глауконита более 30% [11], однако его особенности исследованы мало.

Загрязнение окружающей среды отходами фармацевтических предприятий (фармполлютантами) – одна из актуальных экологических проблем. Основной причиной попадания фармполлютантов в объекты окружающей среды является все возрастающее количество выбросов и отходов. Так, фармполлютанты обнаруживаются в почве, донных отложениях, поверхностных, сточных, грунтовых водах и даже в питьевой воде. Одной из основных причин загрязнения природных экосистем является несовершенство существующих методов (хлорирование, озонирование, сорбирование углем и др.) очистки сточных вод фармацевтических предприятий от фармполлютантов и, прежде всего, их дороговизна [12].

Недостаточная изученность сорбционных свойств природного глауконита Белоозёрского

месторождения ограничивает возможность его применения в водоочистных системах. Нами изучены химический состав Белоозёрского глауконита, морфология его поверхности, некоторые текстурные характеристики обогащенного глауконита и его сорбционные свойства по отношению к органическому фармпрепарату – амброксалу гидрохлориду.

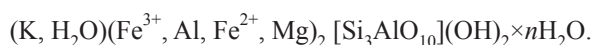
### Экспериментальная часть

**Приборы и материалы.** В качестве сорбата применяли фармпрепарат – амброксол (4-[(2-амино-3,5-дибромфенил) метиламино]циклогексан-1-ол) в форме гидрохлорида (ЗАО НПЦ «Борщаговский химико-фармацевтический завод»).

Для исследования кинетики поглощения катионов амброксола в статических условиях 0,5 г образца сорбента заливали 25 мл исходного раствора сорбата концентрацией  $4,34 \cdot 10^{-4}$  моль/л, тщательно перемешивали в заданном интервале времени ( $t_{\text{сорб}}$ ) при  $T = 20\text{--}25$  °С до состояния равновесия. Величина рН исходного раствора составляла 6,0–6,5. По истечении заданного времени отфильтровывали раствор в два этапа: сначала через фильтровальную бумагу, затем через целлюлозно-ацетатный фильтр «Владипор» (размер пор 0,2 мкм, диаметр 25 мм), используя оправу для фильтра и одноразовый шприц вместимостью 10 см<sup>3</sup>. Остаточную концентрацию сорбата ( $C_{\text{ост.}}$ ) определяли по результатам трех параллельных опытов с помощью спектрофотометра «Shimadzu UV-2550» (при  $\lambda = 307$  нм), используя предварительно построенный градуировочный график. Относительная погрешность определения не превышала 3%. Для построения изотермы сорбции ионов амброксола гидрохлорида использовали следующие концентрации сорбата (моль/л):  $14,47 \cdot 10^{-4}$ ;  $11,58 \cdot 10^{-4}$ ;  $8,10 \cdot 10^{-4}$ ;  $5,79 \cdot 10^{-4}$ ;  $2,89 \cdot 10^{-4}$ .

### Результаты и их обсуждение

Используемый в работе глауконит представляет собой природную композицию переменного состава



Данный минерал относится к слоистым алюможелезосиликатам с пористой структурой типа 2:1 (между двумя сетками тетраэдров заключена одна сетка октаэдров). Однотипные слои разделены прослойками из катионов  $K^+$ , воды и обменных катионов). Ионы кремния в тетраэдрах способны замещаться на

ионы алюминия, что приводит к возникновению положительного заряда. Благодаря слоистой структуре глауконит обладает хорошими сорбирующими и ионообменными свойствами.

В качестве сорбента использовали глауконитовую руду и обогащенную фракцию глауконита, для получения которой исходный глауконитовый песок предварительно просеивали через сито для отделения от посторонних примесей, после чего проводили сепарацию кварца от магнитной фракции глауконита [13].

Морфологические характеристики полученной фракции изучали на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) «MIRA 2 LMU» («Tescan», Чехия), оснащенном системой энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350. Для получения изображений поверхности исследуемого образца пробу порошка глауконита фиксировали на специальной углеродной подложке (углеродный скотч) и после напыления образцов золотом производили съемку (в данном случае исследуется приповерхностный слой вещества с глубиной генерации полезного сигнала 1 мкм).

По внешнему виду природный глауконит представляет собой зерна серо-зеленого цвета, различные по форме и размеру. Зерна имеют слоистую поверхность, образованную округлостями, составленными из чешуек разной формы и размера (рис. 1). Толщина чешуек варьирует от 10 до 90 нм, расстояние между чешуйками составляет 10–200 нм.

Определение химического состава руды и обогащенного глауконита проводили с помощью системы энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350 (СЭМ), а также на рентгенофлуориметре «Innov X-5000» с кремниевым дрейф-детектором в режиме «почва» (табл. 1).

Из приведенных данных следует, что в исследуемых образцах глауконита больше всего содержится атомарного кислорода (O) и кремния (Si). Кроме того, глауконит богат различными микроэлементами, содержание которых колеблется на уровне ppm. Из табл. 1 также видно, что содержание некоторых макроэлементов в обогащенном глауконите выше, чем в глауконитовой руде.

Рентгенофазовый анализ проводили на установке «Gemini / Xcalibur» (Single Crystal Diffractometer) компании «Oxford Diffraction Limited», использовали рентгеновскую трубку с медным анодом. Проведение идентификации минерала по его кристаллоструктурным характеристикам позволило получить качественный

Т а б л и ц а 1

Средний макро- и микроэлементный состав (*m*, %) руды (1) и обогащенного глауконита (2)

Макроэлементы		C	O	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Fe
<i>m</i> , %	1	10,07	52,62	0,42	2,65	31,20	–	1,21	1,73	5,47
	2	14,21	48,27	1,05	3,54	20,98	1,10	1,95	2,16	7,59
Микроэлементы		Cr	Mn	Ba	Co	Cu	Zn	V	Ti	Sr
<i>m</i> , %	1	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$6,9 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-2}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$9,7 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$
	2	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$5,6 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-2}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$9,8 \cdot 10^{-3}$

фазовый состав, характерный для глауконита Белоозёрского месторождения:

аннит ( $KFe_3(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$ ),  
 биотит ( $K(Mg,Fe)_3[AlSi_3O_{10}](OH,F)_2$ ),  
 эпистильбит ( $Ca_3(Si_{18}Al_6)O_{48} \cdot 16H_2O$ ),  
 геденбергит ( $CaFaSi_2O_6$ ),  
 алюмокалиевый оксид ( $Al_2K_2O_4$ ),  
 санидин ( $K(Si_3Al)O_8$ ),  
 железнопериклаз ( $(Mg,Fe)O$ ),  
 кварц ( $SiO_2$ ).

Характеристические межплоскостные расстояния всех исследуемых фракций сорбента ( $d_{hkl}$ ) и соответствующие интенсивности брэгговских рефлексов (*I*, %) приведены в табл. 2, где показано, что значения межплоскостных расстояний у данных фракций исследуемого минерала практически тождественны. Следовательно, процесс получения обогащенного глауконита не изменяет первоначальную структуру кристаллической решетки. В качестве примера на рис. 2 приведена дифрактограмма обогащенного глауконита.

Термографический анализ исследуемых фракций глауконита проводили на дериватогра-

фе «Paulik-Paulik-Erdei-OD-103». Анализ проводили в следующих условиях:  $m_{нав.} = 200$  мг,  $V = 10$  °C/мин,  $T = 20-1000$  °C.

Вопрос о количестве структурно связанной воды в минералах является одним из важнейших

Т а б л и ц а 2

## Результаты рентгеноструктурного анализа образцов глауконитового сорбента

Глауконитовая руда		Глауконит обогащенный	
$d_{hkl}$	<i>I</i> , %	$d_{hkl}$	<i>I</i> , %
0,667	33,15	0,674	76,35
0,417	45,91	0,429	84,85
0,331	100,00	0,331	100,00
0,181	16,80	0,180	50,16
0,166	11,26	0,166	42,71
0,151	7,26	0,150	39,92
0,137	15,83	0,137	47,00

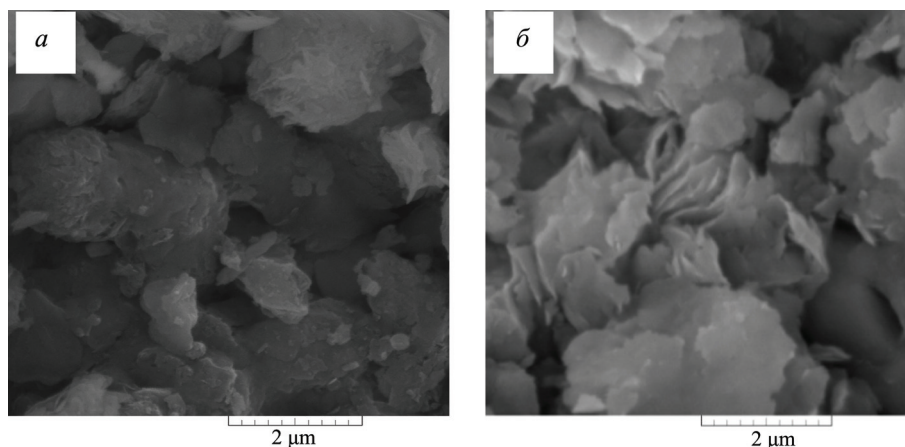


Рис. 1. Электронномикроскопические снимки поверхности (увеличение в  $50 \times 10^3$  раз):  
 а – глауконитовой руды, б – обогащенного глауконита

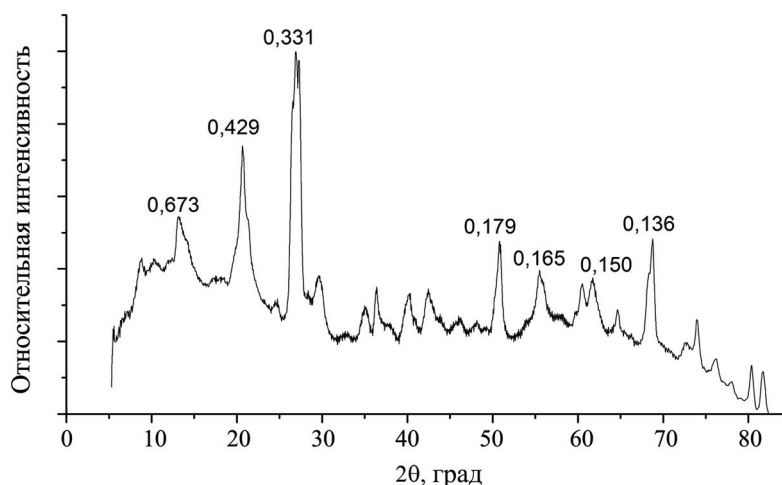


Рис. 2. Дифрактограмма обогащенного глауконита

в кристаллохимии. По результатам термографического анализа вышеуказанных фракций глауконита было установлено наличие на термограммах нескольких небольших эндотермических эффектов: в интервале температур 70–140 °С, в интервале 360–540 °С и при 573 °С. Первый эндоэффект (70–140 °С) обусловлен удалением адсорбционной влаги. Второй, менее интенсивный, эндотермический эффект в среднетемпературной области (360–540 °С) может быть отнесен к выделению конституционной воды (межслоевой). Третий эндоэффект, согласно литературным данным, соответствует  $\alpha$ - $\beta$ -переходу кварца при 573 °С. Глауконитовая руда содержит воду в следовых количествах, а убыль массы при достижении 900 °С составляет 3,5%. Глауконит обогащенный содержит 2% воды, а убыль массы при достижении 900 °С составляет 6%.

Текстурные характеристики алюмосиликата изучены методом измерения удельной поверхности сорбентов (БЭТ), основанным на измерении равновесной адсорбции азота при 77 К на приборе «Quantachrome nova 2200». Полученные изотермы адсорбции-десорбции азота на исследуемых образцах по IUPAC-классификации относятся к изотермам IV типа, которые характеризуются наличием петли капиллярно-конденсационного гистерезиса, что является признаком наличия мезопор размером от 2 до 50 нм (рис. 3). Резкий подъем на изотерме при отношении  $P/P_0$ , близком к 1, указывает на небольшое число крупных пор в образце. При этом резкий подъем в области низких давлений свидетельствует о вкладе изотермы I типа, которая характерна для микропористых сорбентов. Можно также отметить, что по классификации

де Бура форма петли гистерезиса соответствует типу В и указывает на наличие щелевидных пор [14, 15]. Таким образом, все исследуемые образцы имеют преобладающую мезопористую структуру и небольшое число микро- и макропор. Из адсорбционной и десорбционной ветвей изотерм получены значения удельной поверхности и суммарного объема пор (при  $P/P_0 = 0,98$ ) (табл. 3).

Данные, приведенные в табл. 3, показывают, что текстурные характеристики исходного глауконита (руды) и полученного на его основе обогащенного глауконита отличаются друг от друга. Так, обогащенный глауконит имеет большее значение удельной поверхности и суммарного объема пор, по сравнению с глауконитовой рудой. Как видно из табл. 3, представленные

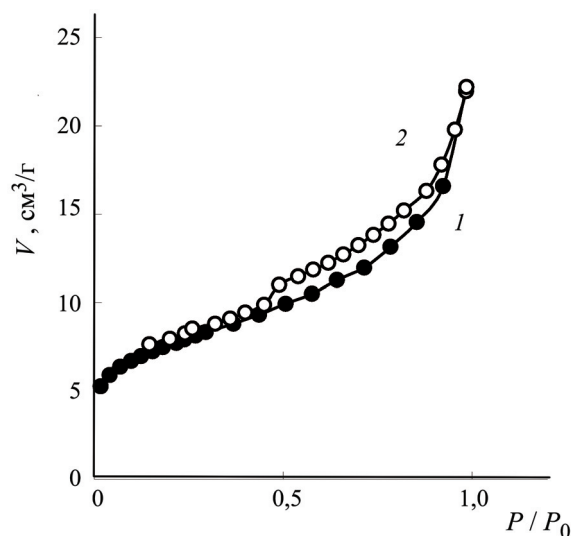


Рис. 3. Изотерма адсорбции (1) и десорбции (2) азота при 77 К на обогащенном глауконите

Т а б л и ц а 3

## Некоторые текстурные характеристики различных фракций глауконита методом БЭТ

Образец	Удельная поверхность по БЭТ, м <sup>2</sup> /г	Суммарный объем пор ( $P/P_0 = 0,98$ ), см <sup>3</sup> /г
Глауконитовая руда	21,06	0,037
Обогащённый глауконит	35,04	0,048

сорбционные материалы имеют малый объем пор и относительно невысокую удельную поверхность. На основании этого можно предположить, что при очистке воды с использованием природных минералов не будут сказываться внутридиффузионные процессы, а это должно положительно влиять на скорость достижения сорбционного равновесия. В то же время низкое значение удельной поверхности может отразиться на величине максимальной сорбционной емкости.

Сорбция веществ глауконитом – многостадийный процесс, напрямую зависящий от пористости сорбента и зазоров между контактирующими частицами. Глауконит характеризуется активной адсорбирующей поверхностью и наличием функциональных групп (силанольных, силоксановых и др.), способных связывать ионы различной природы [14].

Из рис. 4 видно, что амброксол в течение двух часов сорбируется глауконитом в две стадии. Кинетическая кривая имеет перегиб при сорбции амброксола гидрохлорида в течение первых 5 мин, после чего сорбция идет значи-

тельно медленнее, что связано с возникновением диффузионных затруднений в прохождении катионов амброксола через слой продукта, формирующийся на поверхности сорбента.

На основании полученных результатов рассчитывали емкость сорбента по определяемому катиону (моль·г<sup>-1</sup>):

$$CE = [(C_{исх.} - C_{ост.}) V]/m,$$

где  $C_{исх.}$  и  $C_{ост.}$  – исходная и остаточная концентрация органического катиона (моль/л);  $V$  – объем раствора (мл);  $m$  – навеска ионита (г).

Полученные данные сорбционной емкости использовали для построения изотерм сорбции (рис. 5). Как видно из рис. 5, изотермы сорбции амброксола на используемых сорбентах можно отнести к изотерме Ленгмюра, выражаемой зависимостью:

$$CE = CE_{\infty} (K_{л} \cdot C_{равн.}) / [(K_{л} \cdot C_{равн.}) + 1],$$

где  $CE_{\infty}$  – максимальная емкость сорбента;  $C_{равн.}$  – равновесная концентрация сорбата в растворе, моль/л;  $K_{л}$  – константа сорбции по уравнению Ленгмюра.

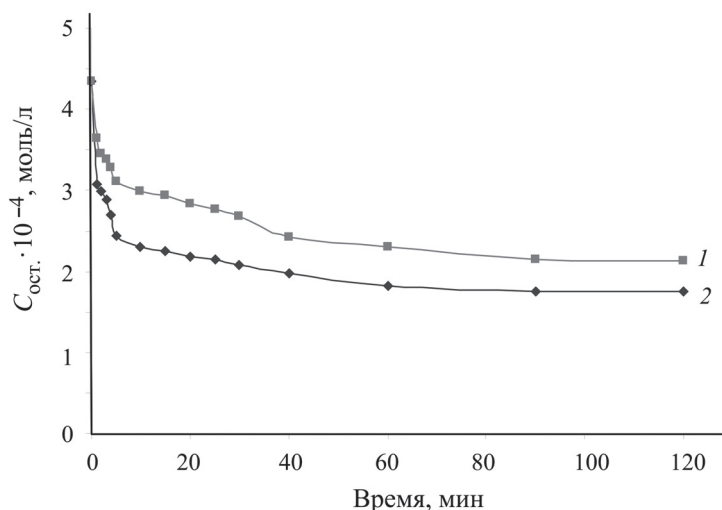


Рис. 4. Кинетика сорбции ионов амброксола в течение 2 ч: 1 – глауконитовой рудой, 2 – обогащенным глауконитом



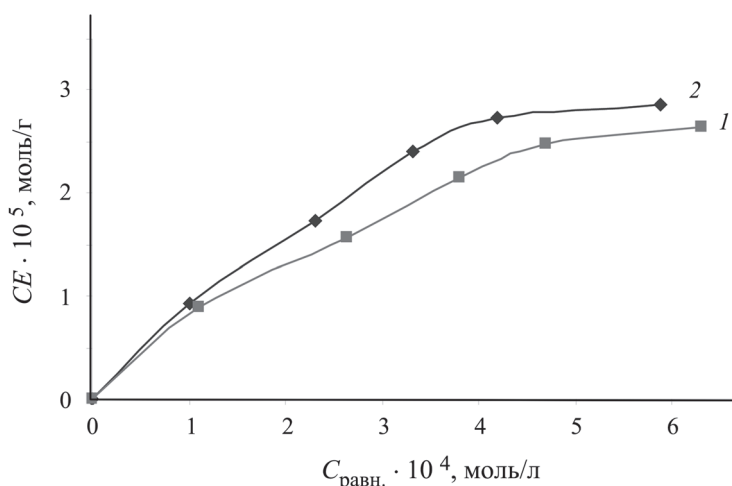


Рис. 5. Изотермы сорбции амброксола: 1 – глауконитовой рудой, 2 – обогащенным глауконитом ( $m_{\text{сорб.}} = 0,5$  г;  $V = 25$  мл;  $\text{pH} 6,5$ ;  $t = 120$  мин)

Хорошая аппроксимация уравнением Ленгмюра свидетельствует о том, что адсорбция локализована на отдельных адсорбционных центрах с образованием мономолекулярного слоя. Крутой восходящий фронт полученных изотерм свидетельствует о хемосорбционном и (или) ионообменном характере взаимодействия [15] ионов с поверхности сорбционных материалов. Аналогичный вид изотерм сорбции свидетельствует об однотипном характере взаимодействия распределяемого лекарственного соединения в системе водный раствор – глауконитовый сорбент. При обработке экспериментальных данных по уравнению изотермы адсорбции Ленгмюра получены величины предельной сорбции  $CE_{\infty}$  и константы  $K_L$  для исследуемых образцов. Для глауконитовой руды и обогащенного глауконита максимальная емкость сорбента  $4,62 \cdot 10^5$  и  $6,71 \cdot 10^5$  моль/г, а константа сорбции по уравнению Ленгмюра  $21,7 \cdot 10^{-3}$  и  $17,5 \cdot 10^{-3}$  л/моль соответственно.

Полученные данные свидетельствуют о том, что проведение процесса обогащения исходной глауконитовой руды с использованием метода магнитной сепарации приводит к увеличению его сорбционной емкости (в сравнении с

природным образцом) по отношению к ионам амброксола гидрохлорида на 45%, а также к увеличению количества и доступности функциональных групп, способных связывать ионы лекарственного вещества.

Для оценки эффективности сорбции амброксола исследуемыми сорбентами рассчитывали степень извлечения ( $R$ , %), которая для глауконитовой руды составила 68%, а для обогащенного глауконита – 75%.

### Выводы

1. Исследованы адсорбционные свойства минерала глауконита Белоозёского месторождения по отношению к ионам амброксола гидрохлорида.

2. При обогащении минерального сорбента методом магнитной сепарации наблюдается увеличение сорбционной активности по отношению к исследуемым ионам на 45%.

3. Процесс адсорбции описывается уравнением Ленгмюра, что свидетельствует о мономолекулярном характере адсорбции на активных центрах поверхности.

4. Проведенные исследования актуальны для использования глауконита в качестве сорбентов в процессах водоочистки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бетехтин А.Г. Курс минералогии. М., 1956. С. 451.
2. Вигдорович В.И., Цыганкова Л.Е., Николенко Д.В. и др. // Сорбционные и хроматографические процессы. 2010. Т. 10. № 1. С. 125.
3. Вигдорович В.И., Цыганкова Л.Е., Акулов А.И. // Сорбционные и хроматографические процессы. 2010. Т. 10. №4. С. 503.
4. Вигдорович В.И., Цыганкова Л.Е., Акулов А.И. // Сорбционные и хроматографические процессы. 2011. Т. 11, №2. С. 675.
5. Вигдорович В.И., Николенко Д.В. и др. // Сорбционные и хроматографические процессы. 2010. Т. 10. № 6. С. 30.
6. Вигдорович В.И., Богданова Е.П., Цыганкова Л.Е. // Сорбционные и хроматографические процессы. 2011. Т. 11. № 6. С. 918.

7. Вигдорovich В.И., Цыганкова Л.Е., Щель Н.В. // Сорбционные и хроматографические процессы. 2014. Т. 14. № 4. С. 661.
8. Вигдорovich В.И., Цыганкова Л.Е., Морцинина И.В. // Сорбционные и хроматографические процессы. 2014. Т. 14. № 2. С. 289.
9. Kutergin A.S., Nikiforov A.F., Voronina A.V. et. al. // Russian Journal of Water management of Russia: problems, technologies, management. 2010. № 3, P. 78.
10. Григорьева Е.А., Антошкина Е.Г. // Молодой ученый. 2012. Т. 40, № 5. С. 123.
11. Левченко М.Л. // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2008. Вып. 2. С. 23.
12. Ivshina I.B., Vikhareva E.V., Richkova M.I., Mukhutdinova, A.N., Karpenko, J.N. // World Journal of Microbiology and Biotechnology. 2012. Vol. 28. N 10. P. 3010.
13. Пат. РФ 2462305 (Опубл. 2011.). Способ получения гранулированного сорбента.
14. IUPAC Manual of Symbols and Terminology, Appendix 2. Pt. 1. Colloid and Surface Chemistry. Pure Appl. Chem. Vol. 31. 1972. P. 578.
15. Савельев Г.Г., Юрмазова Т.А., Шахова Н.Б. // Изв. вузов. Химия и химическая технология. 2011. Т. 53. № 3. С. 36.

Поступила в редакцию 12.02.17

## DETERMINATION OF SORPTION CHARACTERISTICS OF GLAUKONITE AT EXTRACTION OF PHARMACEUTICAL FROM WATER ENVIRONMENTSTS

**S.B. Venig, R.K. Chernova, V.G. Serzhantov, V.P. Splyukhin, M.A. Perespelova,  
E.I. Selifonova\*, G.N. Naumova, A.M. Zakharevich, A.A. Selifonov,  
I.O. Kozhevnikov, N.N. Scherbakova**

*(Saratov national research state university of N. G. Chernyshevsky (Educational and scientific institute of nanostructures and biosystems, department of nanoanalytics; \*e-mail: selif-ei@yandex.ru)*

The way of receiving the enriched glaukonit on the basis of a natural mineral of the Beloozyorsky field of the Saratov region is developed. Results of studying of chemical composition, structure of a surface and some physical and chemical properties of exemplars of a sorbent are given. In article research of process of a sorption of ions of Ambroxol of a hydrochloride of aqueous solutions, natural and enriched glaukonity is conducted. Sorption isotherms which are approximated by Lengmyur's equation are received, and values of the maximal sorptive capacities are calculated. On the basis of the obtained data conclusions are drawn on a possibility of use of the studied natural mineral sorbents for extraction of the above the veshchestvaykh from aqueous solutions.

**Key words:** glaukonit, a sorption, isotherms, Ambroxol a hydrochloride, porosity, water treatment.

**Сведения об авторах:** *Вениг Сергей Борисович* – зав. кафедрой материаловедения, технологии и управления качеством на ФНБМТ, профессор, докт. физ.-матем. наук (sergey.venig@mail.ru); *Чернова Римма Кузьминична* – профессор кафедры аналитической химии и химической экологии химического факультета СГУ им. Н.Г. Чернышевского, докт. хим. наук (chernov-ia@yandex.ru); *Сержантов Виктор Геннадиевич* – доцент кафедры аналитической химии и химической экологии химического факультета СГУ им. Н.Г. Чернышевского, канд. физ.-матем. наук (serzhantov55@mail.ru), *Сплюхин Владимир Петрович* – науч. сотр. СГУ им. Н.Г. Чернышевского (spluhinvp@mail.ru); *Переспелова Марина Алексеевна* – студентка химического факультета СГУ им. Н.Г. Чернышевского (marina.aleks.p@bk.ru); *Селифонова Екатерина Игоревна* – ст. науч. сотр. лаборатории наноаналитики ОНИ НС и БС СГУ им. Н.Г. Чернышевского, канд. хим. наук (selif-ei@yandex.ru); *Наумова Галина Николаевна* – лаборант лаборатории наноаналитики ОНИ НС и БС СГУ им. Н.Г. Чернышевского (naumova.galinka.93@mail.ru), *Захаревич Андрей Михайлович* – зав. лабораторией диагностики наноматериалов и структур ОНИ НС и БС СГУ им. Н.Г. Чернышевского, канд. физ.-матем. наук (Zaharevicham@yandex.ru); *Селифонов Алексей Андреевич* – (selif-ei@yandex.ru), *Кожевников Илья Олегович* – инженер отдела наномеханики ОНИ НС и БС СГУ им. Н.Г. Чернышевского (kozhevnikov\_io@mail.ru); *Щербакова Наталья Николаевна* – науч. сотр. СГУ им. Н.Г. Чернышевского, канд. техн. наук.