



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 544.723.23

doi: 10.17308/sorpchrom.2022.22/9221

Иммобилизация гидрохлорида доксициклина на клиноптилолите

Татьяна Анатольевна Крысанова[✉], Наталья Владимировна Мироненко,
Валерия Алексеевна Кирилова, Вячеслав Александрович Крысанов

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

[✉]takrys@yandex.ru

Аннотация. Современные фармакологические исследования по иммобилизации лекарственных веществ на природных сорбентах считают перспективным использование энтеросорбентов на основе алюмосиликатов в качестве носителей лекарственных препаратов для увеличения стабильности и эффективности их применения. Одним из представителей таких алюмосиликатов является клиноптилолит – цеолитовый туф с развитой поверхностью, высокой сорбционной емкостью и возможностью модификации. Из группы полусинтетических антибиотиков тетрациклинового ряда можно выделить гидрохлорид доксициклина, который по сравнению с другими тетрациклинами практически не угнетает нормальную микрофлору кишечника, отличается высокой биодоступностью. Целью данной работы явилось изучение сорбционной способности клиноптилолита по отношению к гидрохлориду доксициклина.

В качестве объектов исследования были выбраны рекомендованный в качестве энтеросорбента «Климонт» клиноптилолитовый туф Люльинского месторождения (Приполярный Урал Югры), основной фазой которого является клиноптилолит (68%), и антибиотик – гидрохлорид доксициклина.

Сорбционное равновесие в системе клиноптилолит – водный раствор гидрохлорида доксициклина изучали при температуре 298 К в статических условиях методом переменных концентраций в интервале 0.05-4.0 ммоль/дм³ (рН=4.5). Фильтрат анализировали на содержание антибиотика спектрофотометрическим методом на спектрофотометре Shimadzu UV-1800. Для определения содержания внекаркасных катионов сорбента использовали методы пламенной фотометрии и комплексонометрии.

Получена изотерма сорбции гидрохлорида доксициклина на клиноптилолите. Определен вклад обменной и необменной составляющих в сорбционный параметр. Установлено, что мономолекулярной сорбции антибиотика на алюмосиликате соответствует механизм эквивалентного обмена внекаркасных катионов сорбента на катионы препарата за счет электростатического взаимодействия между положительно заряженными NH₃⁺-группами доксициклина и электроотрицательными центрами каркаса сорбента. Выявлено, что формирование полимолекулярных слоев возможно в результате ассоциации доксициклина за счет водородных связей групп С=О пиранозного цикла и гидроксильных групп фенольных группировок.

Изотерма сорбции гидрохлорида доксициклина на клиноптилолите обработана с применением моделей Ленгмюра, Фрейндлиха и Редлиха-Петерсона. Установлено, что сорбция антибиотика из разбавленных растворов наилучшим образом описывается моделью Ленгмюра. Рассчитаны величины сорбционных параметров с использованием линеаризованных уравнений сорбционных моделей и равновесный коэффициент распределения.

Ключевые слова: сорбция, клиноптилолит, гидрохлорид доксициклина

Для цитирования: Крысанова Т.А., Мироненко Н.В., Кирилова В.А., Крысанов В.А. Иммобилизация гидрохлорида доксициклина на клиноптилолите // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2022. Т. 22, № 2. С. 165-172. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/9221>



Original article

Immobilization of doxycycline hydrochloride on clinoptilolite

Tatiana A. Krysanova[✉], Natalia V. Mironenko,
Valeria A. Kirilova, Vyacheslav A. Krysanov

Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation

[✉]takrys@yandex.ru

Abstract. The use of enterosorbents based on aluminosilicates as drug carriers to increase the stability and effectiveness of their use is considered promising in modern pharmacological studies for the immobilization of drugs on natural sorbents. One of the representatives of such aluminosilicates is clinoptilolite, a zeolitic tuff with a developed surface, high sorption capacity and the possibility of modification. From the group of semi-synthetic tetracycline antibiotics, doxycycline hydrochloride, compared with other tetracyclines, practically does not inhibit the normal intestinal microflora and it is characterized by high bioavailability. The purpose of this study was the investigation of the sorption capacity of clinoptilolite with respect to doxycycline hydrochloride.

"Klimont" - clinoptilolite tuff of the Lyulinskoe deposit (Polar Urals of Yugra), the main phase of which is clinoptilolite (68%), and an antibiotic - doxycycline hydrochloride was recommended as an enterosorbent.

Sorption equilibrium in the clinoptilolite - aqueous solution of doxycycline hydrochloride system was studied at a temperature of 298 K under static conditions by the method of variable concentrations in the range 0.05-4.0 mmol/dm³ (pH=4.5). The filtrate was analysed for antibiotic content by a spectrophotometric method using a Shimadzu UV-1800 spectrophotometer. The flame photometry and complexometry methods were used for the determination of the content of extra framework cations of the sorbent.

The sorption isotherm of doxycycline hydrochloride on clinoptilolite was obtained. The contribution of the exchange and non-exchange components to the sorption parameter is determined. It was established that the mechanism of the equivalent exchange of extra framework cations of the sorbent for cations of the preparation due to the electrostatic interaction between positively charged NH₃⁺ groups of doxycycline and electronegative centres of the sorbent framework corresponds to the monomolecular sorption of an antibiotic on aluminosilicate. It was found that the formation of polymolecular layers is possible as a result of the association of doxycycline due to hydrogen bonds of the C=O groups of the pyranose ring and hydroxyl groups of phenol groups.

The sorption isotherm of doxycycline hydrochloride on clinoptilolite was processed using the Langmuir, Freundlich and Redlich-Peterson models. It was found that antibiotic sorption from dilute solutions is best described by the Langmuir model. Values of sorption parameters using linearised equations of sorption models and equilibrium distribution coefficient were calculated.

Keywords: sorption, clinoptilolite, doxycycline hydrochloride

For citation: Krysanova T.A., Mironenko N.V., Kirilova V.A., Krysanov V.A. Immobilization of doxycycline hydrochloride on clinoptilolite. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2022. 22(2): 165-172. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/9221>

Введение

Современные исследования фармакологического направления [1-4], посвященные иммобилизации биологически активных веществ на природных сорбентах, свидетельствуют о возросшем интересе к изучению свойств энтеросорбентов на основе алюмосиликатов, которые могут использоваться как эффективные

носители лекарственных препаратов пролонгированного действия. Среди природных алюмосиликатов перспективным для использования в медицине и биотехнологии можно считать клиноптилолит – сорбент, имеющий развитую поверхность, высокую адсорбционную емкость и возможность химической модификации для изменения его селективности [5,6]. Из группы полусинтетических антибиотиков широкого спектра действия нужно

выделить гидрохлорид доксициклина, который по сравнению с другими тетрациклинами обладает рядом преимуществ: легкое связывание с белками плазмы, высокая биодоступность, незначительное негативное воздействие на микрофлору кишечника [7,8]. Целью данной работы явилось изучение сорбционной способности клиноптилолита по отношению к гидрохлориду доксициклина.

Экспериментальная часть

Объектом исследования являлся клиноптилолит Люльинского месторождения Приполярного Урала Югры (68%) – представитель минералов из группы алюмосиликатов щелочных и щелочноземельных элементов с тетраэдрическим каркасом, включающим полости с катионами (K^+ , Na^+ , Ca^{2+} и Mg^{2+}) и молекулами воды [9]. Размер частиц сорбента составлял 0.02-0.06 мм. Данный алюмосиликат используется как энтеросорбент «Климонт», имеющий большое сродство к гидрофильным органическим соединениям (молярное отношение $Si/Al=3.9$).

В работе использовали антибиотик – гидрохлорид доксициклина ((4*S*,4*aR*,5*S*,5*aR*,6*R*,12*aS*) – 4-диметиламино-3,5,10,12,12*a*-пентагидрокси-6-метил-1,11-диоксо-1,4,4*a*,5,5*a*,6,11,12*a*-октагидротетрацен-2-карбоксамид гидрохлорид) фирмы Nihitechhealthcare (Индия). Структурная формула препарата представлена на рис. 1 [7].

Иммобилизацию гидрохлорида доксициклина на клиноптилолите исследовали при температуре 298 К в статических

условиях методом переменных концентраций антибиотика в интервале 0.05-4.00 ммоль/дм³ при pH=4.5, при котором доксициклин находился в растворе преимущественно в виде катиона [10]. Воздушно-сухие навески алюмосиликата массой 0.10 г±0.0002 г заливали в колбы на 200.0 см³ водными растворами доксициклина различной концентрации. Содержимое колб перемешивали и оставляли на время, необходимое для достижения равновесия, которое было установлено из предварительного кинетического эксперимента.

После достижения равновесия в системе раствор доксициклина отделяли от частиц сорбента фильтрованием. В фильтрате определяли содержание внекаркасных катионов и препарата в равновесном растворе. Содержание антибиотика выявляли спектрофотометрическим методом, используя спектрофотометр Shimadzu UV-1800, при аналитической длине волны $\lambda=275$ нм ($\epsilon_{275}=8820$ дм³/(моль·см), $S_r=0.003$). Концентрацию ионов Na^+ и K^+ в равновесном растворе определяли методом пламенной фотометрии (ошибка 2%), ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} – методом комплексонометрии (ошибка 0.4%). Количество сорбированного антибиотика устанавливали по разности концентраций раствора до и после контакта с сорбентом. Результаты эксперимента подвергались обработке методом математической статистики при доверительной вероятности 0.95.

Регистрацию ИК спектров сорбента до и после контакта с водным раствором гидрохлорида доксициклина проводили

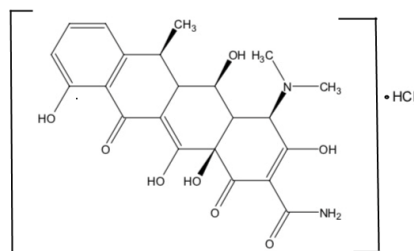


Рис. 1 Химическая формула гидрохлорида доксициклина
Fig. 1 Chemical formula of doxycycline hydrochloride

при $T=298$ К, используя спектрометр Bruker Equinox 55 с Фурье-преобразованием в режиме диффузионного отражения в интервале частот $400-4000$ см^{-1} с разрешением 4 см^{-1} . Ошибка метода равна 3%. Для интерпретации полученных ИК спектров использовали литературу [11,12].

Обсуждение результатов

Иммобилизация на алюмосиликатах биологически активных веществ (в частности, антибиотиков) является сложным процессом, включающим в себя как возможность ионного обмена внекаркасных катионов с катионами антибиотика, так и появление дополнительных полимолекулярных взаимодействий в системе.

Межфазное распределение гидрохлорида доксициклина в системе клиноптилолит – водный раствор антибиотика приведено на рис. 2. По номенклатуре ИЮПАК изотерму можно отнести к IV типу, S-форма по классификации Джайлса [13] свидетельствует о возможном полислоном закреплении доксициклина на клиноптилолите.

Выявлен линейный вид изотермы сорбции препарата из раствора с концентрацией менее 1.0 ммоль/дм^3 . С ростом концентрации антибиотика на изотерме появляется незначительное плато, что

предполагает возможность монослойного закрепления катионов доксициклина на клиноптилолите в результате их электростатического взаимодействия с алюмоокислородным каркасом сорбента, заряженным отрицательно [14].

Формирование мономолекулярного слоя сопровождается выделением из сорбента в равновесный раствор эквивалентного количества внекаркасных подвижных катионов. Малое количество ионообменного сорбированного антибиотика, равное 0.05 ммоль/г , может быть связано с недоступностью большинства заряженных центров клиноптилолита для катионов доксициклина.

Иммобилизация доксициклина на клиноптилолите проявляется в появлении на ИК-спектре сорбента дополнительных полос поглощения и смещением максимумов основных полос поглощения. Механизм эквивалентного обмена катионов доксициклина на активных центрах сорбента характеризуется смещением частот валентных колебаний, соответствующих Si–O–(Al) группам клиноптилолита ($1106 \rightarrow 1062$ и $1022 \rightarrow 1010$ см^{-1}), валентным и деформационным колебаниям NH_3^+ -групп антибиотика ($2823 \rightarrow 2800$ см^{-1} и $1545 \rightarrow 1520$ см^{-1} соответственно) в низкочастотную область спектра по сравнению со спектром исходного сорбента.

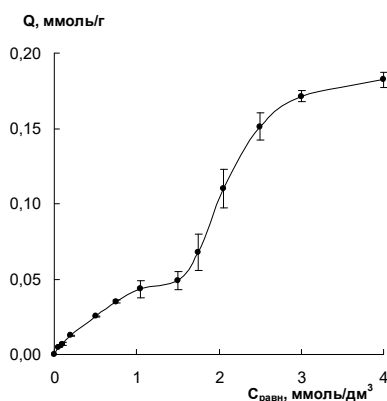


Рис.2 Изотерма сорбции водного раствора гидрохлорида доксициклина на клиноптилолите при 298 К

Fig. 2 Sorption isotherm of an aqueous solution of doxycycline hydrochloride on clinoptilolite at 298 K

Таблица 1. Значения сорбционных параметров, рассчитанных с использованием уравнений Ленгмюра, Фрейндлиха и Редлиха-Петерсона
 Table 1. Values of sorption parameters calculated using the Langmuir, Freundlich and Redlich-Peterson equations

Модель Ленгмюра				
Гидрохлорид доксициклина	K_L , $\text{дм}^3/\text{моль}$	\bar{Q}_∞ , $\text{ммоль}/\text{г}$		R^2
	1.07	0.08		0.99
Модель Фрейндлиха				
Гидрохлорид доксициклина	K_F , $\text{дм}^{3/1/n}(\text{ммоль})^{1-1/n}/\text{г}$	n		R^2
	1.42	1.25		0.97
Модель Редлиха-Петерсона				
Гидрохлорид доксициклина	K_R , $\text{л}/\text{г}$	a_R , $\text{дм}^{3\beta}/\text{ммоль}^\beta$	β	R^2
	1.11	1.12	0.85	0.95

где Q_∞ – предельное количество сорбированного антибиотика (емкость монослоя), ммоль/г; K_L – константа сорбционного равновесия, $\text{дм}^3/\text{ммоль}$; n – константа изотермы Фрейндлиха; K_F – константа изотермы Фрейндлиха (сорбционная емкость) $(\text{дм}^3)^{1/n}(\text{ммоль})^{1-1/n}/\text{г}$; a_R и K_R – константы изотермы Редлиха – Петерсона, $(\text{дм}^3)^\beta/\text{ммоль}^\beta$ и $\text{дм}^3/\text{г}$ соответственно; β – константа, значение которой должно лежать в интервале $0 < \beta < 1$.

where Q_∞ is limiting amount of sorbed antibiotic (monolayer capacity), mmol/g; K_L is sorption equilibrium constant, $\text{дм}^3/\text{ммоль}$; n is Freundlich isotherm constant; K_F is Freundlich isotherm constant (sorption capacity) $(\text{дм}^3)^{1/n}(\text{ммоль})^{1-1/n}/\text{г}$; a_R and K_R are Redlich-Peterson isotherm constants, $(\text{дм}^3)^\beta/\text{ммоль}^\beta$ and $\text{дм}^3/\text{г}$, respectively; β is constant with the value in the range $0 < \beta < 1$.

Рост концентрации раствора антибиотика выше $1.5 \text{ ммоль}/\text{дм}^3$ приводит к резкому увеличению сорбционной емкости сорбента по доксициклину (без изменения ионообменной составляющей процесса сорбции), максимальная величина которой равна $0.18 \text{ ммоль}/\text{г}$. Закрепление на отрицательных центрах каркаса клиноптилолита катионов доксициклина делает их новыми центрами сорбции для следующих слоев антибиотика. Полислойная сорбция доксициклина возможна в результате формирования его ассоциатов за счет водородных связей [13].

Закрепление антибиотика на клиноптилолите в виде ассоциатов отражается на ИК спектре в батохромном сдвиге полос поглощений, отвечающих валентным колебаниям группы $\text{C}=\text{O}$ пиранозного цикла ($1063 \rightarrow 1040 \text{ см}^{-1}$), и валентным колебаниям OH -группы фенольной группировки ($3250 \rightarrow 3220 \text{ см}^{-1}$), участвующих в образовании водородных связей.

Количественные характеристики сорбции препарата на клиноптилолите в интервале концентраций монослойного закрепления антибиотика определяли, используя модели Ленгмюра, Фрейндлиха и

Редлиха-Петерсона [15-17]. Значения констант, входящих в уравнения моделей сорбции, рассчитывали по линеаризованным уравнениям данных моделей, также были определены коэффициенты корреляции (табл.1).

Выявлено, что сорбция доксициклина по эквивалентному обмену с внекаркасными катионами описывается уравнением Ленгмюра с максимальной вероятностью, это подтверждается полученными значениями коэффициентов корреляции (R^2). Близкое к единице значение параметра β в уравнении Редлиха-Петерсона подтверждает сорбцию антибиотика из разбавленных растворов по механизму Ленгмюра, учитывая равноценность активных центров и однородность поверхности клиноптилолита.

Рассчитан равновесный коэффициент распределения (D), отвечающий за селективность сорбента к гидрохлориду доксициклина во всей области исследуемых концентраций раствора (рис.3):

$$D = \frac{Q \cdot W}{C_p}$$

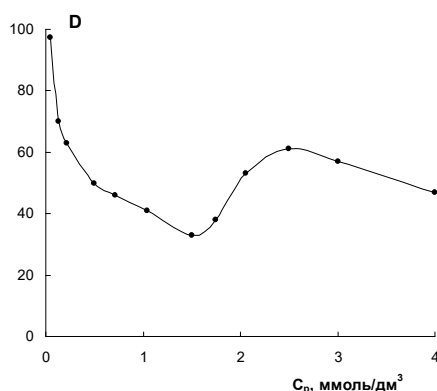


Рис. 3 Зависимость коэффициента распределения гидрохлорида доксициклина от его равновесной концентрации

Fig. 3 Dependence of the distribution coefficient of doxycycline hydrochloride on its equilibrium concentration

где Q – количество антибиотика, закрепленного на сорбенте, ммоль/г; C_p – равновесная концентрация препарата в растворе, ммоль/дм³, W – удельный объем сорбента, г/дм³.

На начальном участке кривой при формировании монослоя наблюдается резкое снижение коэффициента распределения. Рост необменной составляющей сорбции для антибиотика с увеличением концентрации раствора приводит к возрастанию D , затем наблюдается снижение его величины, что обусловлено проявлением стeric фактора [18].

Заключение

Установлены особенности иммобилизации гидрохлорида доксициклина на клиноптилолите при температуре 298 К. Выявлено, что монослойное закрепление антибиотика на клиноптилолите протекает в результате эквивалентного обмена

Список литературы

1. Kevadiya B.D., Joshi G.V., Patel H.A., Ingole P.G., Mody H.M., Bajai H.C. Montmorillonite-alginate nanocomposites as a drug delivery system: Intercalation and in vitro release of vitamin B1 and vitamin B6 // *Journal of Biomaterials Applications*. 2010. Vol. 25. no. 2. P. 161-177. <https://doi.org/10.1177/0885328209344003>

с внекаркасными катионами сорбента, а полимолекулярный характер сорбции связан с образованием ассоциатов гидрохлорида препарата за счет водородных связей. Выявлено, что сорбция антибиотика из разбавленных растворов с максимальной вероятностью описывается моделью Ленгмюра. Рассчитаны величины сорбционных параметров с использованием линеаризованных уравнений Ленгмюра, Фрейндлиха, Редлиха-Петерсона и равновесный коэффициент распределения.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

2. Farias T., Ruiz-Salvador A.R., Velazco L., Menorval L.D., Rivera A. Preparation of natural zeolitic supports for potential biomedical applications // *Materials Chemistry and Physics*. 2009. Vol. 118. P. 322-328. <https://doi.org/10.1016/J.matchemphys.2009.07.054>

3. Чернова Р.К., Вениг С.Б., Наумова Г.Н. Сорбция тетрациклина и продуктов его деструкции глауконитом // *Научный альманах*. 2015. №7 (9). С. 930-934.



4. Власова Н.Н. Взаимодействие высокодисперсного кремнезема с некоторыми лекарственными веществами // *Поверхность*. 2016. Вып.8 (23). С.236-247.
5. Физико-химические и медико-биологические свойства природных цеолитов / под ред. З.В. Белоусова. Новосибирск: Изд-во ун-та геологии и геофизики, 1990. 70 с.
6. Zhuchkov A.N., Berlyand A.S., Alikhanyan A.S., Plesskaya N.A. Sorption properties of the new natural enterosorbent klimont // *Pharm. chemistry journal*. 2011. Vol. 45. no. 2. P.110-113. <https://doi.org/10.1007/s11094-011-0571-5>
7. Егоров Н.С. Основы учения об антибиотиках. М. Наука. 2004. 528 с.
8. Навашин С.М., Фомина И.П. Справочник по антибиотикам. М. Медицина, 1974. 416 с.
9. Котова Д.Л., Крысанова Т.А., Васильева С.Ю., Селеменев В.Ф., Артамонова М.Н. // «Аналитика Сибири и Дальнего Востока», материалы X Всероссийской научной конференции с международным участием. 12-17 сент. 2016 г. Барнаул. С. 106.
10. Полянский Н.Г., Горбунов В.Г., Полянская Н.Л. Методы исследования ионитов. М. Химия. 1976. 208 с.
11. Наканиси К. Инфракрасная спектроскопия и строение органических соединений. М. Мир. 1965. 216 с.
12. Бёккер Ю. Спектроскопия. М. Техносфера. 2009. 528 с.
13. Sing K.S.W. Reporting Physisorption Data for gas/solid Systems with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity // *Pure and Applied Chemistry*. 1982. Vol. 57. no. 11. P. 2201-2218. <https://doi.org/10.1351/PAC19825411221>
14. Котова Д.Л., Фам Тхи Гам, Крысанова Т.А., Васильева С.Ю., Тимченко Ю.А., Бекетов Б.Н. Описание изотермы сорбции гидрохлорида пиридоксина на клиноптилолитовом туфе // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2014. Т. 14. № 4. С. 572-577.
15. Langmuir I. The Constitution and Fundamental Properties of Solids and Liquids / I. Langmuir // *J. Am. Chem. Soc.* 1917. Vol. 39. no. 9. P. 1848-1906. <https://doi.org/10.1021/ja02254a006>
16. Freundlich H.M.F. Over the Adsorption in Solution // *J. Phys. Chem.* 1906. Vol. 57. P. 385-447.
17. Redlich O.A., Peterson D.L. Useful Adsorption Isotherm // *J. Phys. Chem.* 1959. Vol. 63. no. 6. P. 1024. <https://doi.org/10.1021/j150576a611>
18. Пюльман Б. Межмолекулярные взаимодействия: от двухатомных молекул до биополимеров. М. Мир. 1981. 580 с.

References

1. Kevadiya B.D., Joshi G.V., Patel H.A., Ingole P.G., Mody H.M., Bajai H.C. Montmorillonite–alginate nanocomposites as a drug delivery system: Intercalation and in vitro release of vitamin B1 and vitamin B6. *Journal of Biomaterials Applications*. 2010; 25(2): 161-177. <https://doi.org/10.1177/0885328209344003> (In Russ.).
2. Farias T., Ruiz-Salvador A.R., Velazco L., Menorval L.D., Rivera A. Preparation of natural zeolitic supports for potential biomedical applications. *Materials Chemistry and Physics*. 2009; 118: 322-328. <https://doi.org/10.1016/J.matchemphys.2009.07.054>
3. Chernova R.K., Venig S.B., Naumova G.N. Sorption of tetracycline and its degradation products by glauconite. *Scientific Almanac*. 2015; (9): 930-934. (In Russ.).
4. Vlasova N.N. Interaction of highly dispersed silica with some medicinal substances. *Surface*. 2016; 8(23): 236-247. (In Russ.).
5. Physico-chemical and medico-biological properties of natural zeolites / ed. by Z.V. Belousov. Novosibirsk: Publishing House of the University of Geology and Geophysics. 1990. 70 p. (In Russ.).
6. Zhuchkov A.N., Berlyand A.S., Alikhanyan A.S., Plesskaya N.A. Sorption



properties of the new natural enterosorbent klimont. *Pharm. Chemistry journal*. 2011; 45(2): 110-113. <https://doi.org/10.1007/s11094-011-0571-5>

7. Egorov N.S. Fundamentals of the doctrine of antibiotics. M. Nauka. 2004. 528 p. (In Russ.).

8. Nawashin S.M., Fomina I.P. Antibiotic locator. M. Medicine. 1974. 416 p. (In Russ.).

9. Kotova D.L., Krysanova T.A., Vasilyeva S.Yu., Selemenev V.F., Artamonova M.N. "Analytics of Siberia and the Far East", materials of the X All-Russian Scientific Conference with international participation. September 12-17. 2016. Barnaul. 106 p. (In Russ.).

10. Polyansky N.G., Gorbunov V.G., Polyanskaya N.L. Methods of ionite research. M. Chemistry. 1976. 208 p. (In Russ.).

11. Nakanishi K. Infrared spectroscopy and the structure of organic compounds. M. Mir. 1965. 216 p. (In Russ.).

12. Becker Yu. Spectroscopy. M. Technosphere. 2009. 528 p. (In Russ.).

13. Sing K.S.W. Reporting Physisorption Data for gas/solid Systems with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity. *Pure and Applied Chemistry*. 1982; 57(11): 2201-2218. <https://doi.org/10.1351/PAC19825411221>

14. Kotova D.L., Pham Thi Gam, Krysanova T.A., Vasileva S.Yu., Timchenko Yu.A., Beketov B.N. Description of the isotherm of sorption of pyridoxine hydrochloride on clinoptilolite tuff. *Sorbtsionnye i khromatograficheskiye protsessy*. 2014; 14(4): 572-577. (In Russ.).

15. Langmuir I. The Constitution and Fundamental Properties of Solids and Liquids / I. Langmuir. *J. Am. Chem. Soc.* 1917; 39(9): 1848-1906. <https://doi.org/10.1021/ja02254a006>

16. Freundlich H.M.F. Over the Adsorption in Solution. *J. Phys. Chem.* 1906; 57: 385-447.

17. Redlich O.A., Peterson D.L. Useful Adsorption Isotherm. *J. Phys. Chem.* 1959; 63(6): 1024. <https://doi.org/10.1021/j150576a611>

18. Pyulman B. Intermolecular interactions: from diatomic molecules to biopolymers. M. Mir. 1981. 580 p. (In Russ.).

Информации об авторах / Information about the authors

Т.А. Крысанова – доцент кафедры аналитической химии, к.х.н., Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

Н.В. Мироненко – ассистент кафедры аналитической химии, к.х.н., Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

В.А. Кирилова – студент кафедры аналитической химии, Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

В.А. Крысанов – доцент кафедры физической химии, к.х.н., Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

T.A. Krysanova – Ph.D. (chemistry), department of analytical chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: takrys@yandex.ru

N.V. Mironenko – Ph.D. (chemistry), department of analytical chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation

V.A. Kirilova – student, department of analytical chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation

V.A. Krysanov – Ph.D. (chemistry), department of physical chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: krysanov@chem.vsu.ru

Статья поступила в редакцию 15.03.2022; одобрена после рецензирования 15.04.2022; принята к публикации 29.04.2022.

The article was submitted 15.03.2021; approved after reviewing 15.04.2022; accepted for publication 29.04.2022.