

Научная статья

УДК 628.316.12:577.18

doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-494-507

Исследование механизма сорбции антибиотиков природными алюмосиликатами методами спектроскопии

***Д. С. Гальченко, Л. И. Соколова, В. В. Ткачев, Н. П. Шапкин,
В. И. Разов, Я. Ю. Блиновская***

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, galchenko_ds@mail.ru

Аннотация. Применение сорбентов на основе природных алюмосиликатов для очистки сточных вод от различных загрязняющих компонентов широко распространено в различных областях промышленности. В настоящее время активно рассматривается возможность использования данных сорбентов для очистки сточных вод от остаточных количеств антибиотиков, но на данный момент не до конца исследован механизм их сорбции.

В работе исследованы физико-химические свойства сорбента на основе вермикулита Кокша-ровского месторождения (Приморский край) и цеолитов Шивертуйского и Талан-Гогагорского месторождений (Восточного Забайкалья) для извлечения антибиотиков левомецетина, тетрациклина, антибиотика класса фторхинолонов (ципрофлоксацин) и цефалоспоринов (цефазолин). Исследование сорбционных свойств для уточнения механизма сорбции проведено методами рентгенофазового анализа, позитронно-аннигиляционной спектроскопии и сканирующей электронной микроскопии.

На основании проведенных исследований установлено, что сорбция антибиотиков происходит не только за счет интеркаляции, что подтверждается данными рентгенофазового анализа, но и за счет поверхностных взаимодействий и физической сорбции.

Ключевые слова: твердофазная экстракция, сорбция, вермикулит, левомецетин, тетрациклин, цефазолин, ципрофлоксацин

Для цитирования: Гальченко Д. С., Соколова Л. И., Ткачев В. В., Шапкин Н. П., Разов В. И., Блиновская Я. Ю. Исследование механизма сорбции антибиотиков природными алюмосиликатами методами спектроскопии // Гидрометеорология и экология. 2022. № 68. С. 494—507. doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-494-507.

Original article

Antibiotic sorption mechanism investigation by natural aluminosilicates by spectroscopy methods

***D. S. Gal'chenko, L. I. Sokolova, V. V. Tkachev, N. P. Shapkin,
V. I. Razov, Ya. Yu. Blinovskaya***

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia, galchenko_ds@mail.ru

Summary. The use of sorbents based on natural aluminosilicates for the wastewater treatment from various contaminating components is widespread in various fields of industry. Currently, the possibility of

using these sorbents to treat waste water from residual amounts of antibiotics is being actively considered, but at the moment the mechanism of their sorption has not been fully investigated.

The work investigated the physical and chemical properties of a sorbent based on the vermiculite of the Koksharovsky field (Primorsky Territory) and zeolites of the Shivertuysky and Talan-Gozagorskoye fields (East Transbaikalia) for the extraction of antibiotics levomycetin, tetracycline, antibiotic class fluoroquinolones (ciprofloxacin) and cephalosporins (cefazoline). Analysis of sorption properties for clarification of sorption mechanism was carried out by methods of X-ray phase analysis, positron-annihilation spectroscopy and scanning electron microscopy.

Experiments have shown that vermiculites have better sorption properties compared to other aluminosilicates groups. When using them, the maximum removal of antibiotics from the solution is achieved. Studies have shown that the nature of the material will not significantly affect the absorbency. This fact should be taken into account when choosing a sorbent for the treatment of antibiotic-containing water.

Based on the studies conducted, it can be found that sorption of antibiotics occurs not only due to intercalation, which is confirmed by X-ray phase analysis, but also due to surface interactions and physical sorption.

Thus, these methods should be used to evaluate the sorption of the similar classes materials. The obtained indicators form the basis for calculating the amount of material used for the treatment of antibiotic-containing wastewater, the degree of its effectiveness for various groups with an antibiotic and the frequency of its replacement, and the obtained indicators will also form the basis for further studies of wastewater treatment systems, in which they can find practical application.

Keywords: solid phase extraction, sorption, vermiculite, levomycetine, tetracycline, cefazoline, ciprofloxacin

For citation: Gal'chenko D. S., Sokolova L. I., Tkachev V. V., Shapkin N. P., Razov V. I., Blinovskaya Ya. Yu. Antibiotic sorption mechanism investigation by natural aluminosilicates by spectroscopy methods. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2022;(68):494—507. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-494-507.

Введение

Производственная деятельность, независимо от ее типа, масштабов и расположения сопровождается активным воздействием на окружающую среду. В соответствии с требованиями природоохранного законодательства предприятие обязано разрабатывать мероприятия, направленные на уменьшение негативных последствий, из которых наиболее существенными являются сточные воды. Их состав чрезвычайно разнообразен, в связи с чем выбор технологии их очистки сопряжен с определенными трудностями, обусловленными с одной стороны необходимостью достижения допустимых концентраций сбрасываемых загрязняющих веществ, с другой стороны, технико-экономическими возможностями производства.

Среди существующих решений в области очистки выделяются методы сорбции, основанные на поглощении загрязняющих веществ либо поверхностным слоем (адсорбенты), либо объемным поглощением (абсорбенты). Современный рынок сорбентов характеризуется значительным разнообразием. Однако производство специальных материалов связано с определенными затратами, включая экосистемные. В этой связи альтернативой являются натуральные сорбенты, характеризующиеся доступностью и невысокой стоимостью. Таковыми являются природные алюмосиликаты. Современные источники информации предоставляют исчерпывающую информацию о структуре этих сорбентов и их сорбционных свойствах. В качестве основного направления применения этих сорбентов следует выделить их использование в качестве агента, способствующего как очистке, так и концентрированию микроколичеств определяемых веществ [1—6]. Кроме того,

использование сорбентов на основе природных алюмосиликатов, в частности вермикулита и цеолитов, является перспективным методом очистки сточных вод от остаточных количеств антибиотиков [7].

Ранее на кафедрах аналитической и физической и аналитической химии ДВГУ и ДВФУ исследована возможность применения некоторых сорбентов на основе природных алюмосиликатов для выделения и концентрирования антибиотиков из пищевых продуктов с различными матрицами [8—15]. Однако систематического исследования сорбционных и физико-химических свойств применяемых сорбентов не проводилось.

В соответствии с этим целью работы является исследование механизма сорбции антибиотиков левомецетина, тетрациклина, цефазолина и ципрофлоксацина сорбентом на основе вермикулита, модифицированного соляной кислотой.

Материалы и методы исследования

Характеристика применяемых антибиотиков

Фармацевтические формы — цефазолин (натриевая соль)®, левомецетин (хлорамфеникол)®, тетрациклин®, ципрофлоксацин (гидрохлорида моногидрат)® — получены из аптечной сети. Им соответствуют стандартные образцы цефазолина, левомецетина, тетрациклина и ципрофлоксацина. Одна упаковка цефазолина содержит 1 г химически чистого антибиотика. Для антибиотиков левомецетина, тетрациклина и ципрофлоксацина производился пересчет на чистое вещество с учетом вспомогательных веществ в таблетке.

Сорбент

В качестве сорбента использовался вермикулит Кокшаровского месторождения (Приморский край), модифицированный 7%-ной соляной кислотой (далее — вермикулит). Сорбент перед использованием промывали дистиллированной водой до получения смывов, не поглощающих в УФ-области спектра при длинах волн 200—400 нм.

Оборудование

Навески образцов исследуемого антибиотика отбирали на электронных весах «GAS» фирмы «ОНАUS Corporation» (США), точность 0,0001 г.

Растворы фотометрировали на УФ-спектрофотометре «UV-mini 1240» «Shimadzu» (Япония). Диапазон используемых длин волн — 200—400 нм. Длина кварцевой кюветы — 1 см.

Определение рН растворов проводили на рН-метре HANNA pH-211. Навески используемых сорбентов отбирали на электронных весах «GAS» фирмы «ОНАUS Corporation» (США), точность 0,01 г.

Дифрактограммы регистрировали на приборе «Advance D8» («Bruker»), используя Cu K_α излучение, в диапазоне углов $2^\circ < 2\theta < 90^\circ$.

Измерения времен жизни и интенсивности аннигиляций позитронов проводились на спектрометре быстро-быстрых задержанных совпадений при помощи сцинтилляционных пластических детекторов размером $\varnothing 25 \times 15$ мм и ФЭУ 87 на базе анализатора «NOKIA LP 4840». Временное разрешение

спектрометра $2\tau_0$ составляет 270 пс для источника ^{60}Co при 30%-ной ширине энергетического «окна». Использовался циклотронный источник ^{44}Ti с активностью 10—15 $\mu\text{Ки}$.

Сканирующая электронная микроскопия и элементный анализ проводились на растровом электронном микроскопе Carl Zeiss Ultra Plus с приставкой для элементного анализа X-max от Oxford instruments.

Для проведения исследования было подготовлено три серии проб. Навески модифицированного вермикулита (по 1 г) помещали в 5 конических колб объемом 100 мл. В колбу № 1 вносили 5 мл раствора левомицетина с концентрацией 0,05 мг/мл, в колбу № 2 — 5 мл раствора тетрациклина с концентрацией 0,05 мг/мл, в колбу № 3 — 5 мл раствора цефазолина с концентрацией 0,05 мг/мл, в колбу № 4 — 5 мл раствора ципрофлоксацина с концентрацией 0,05 мг/мл. Таким образом, соотношение сорбент:сорбат для исследуемых антибиотиков и сорбентов составило 4000:1. В колбу № 5 вносили 5 мл дистиллированной воды. Далее все колбы помещали на шейкер и перемешивали со скоростью 175 об/мин в течение 1 ч, затем оставляли на 24 ч для более полного поглощения антибиотиков. Сорбент отфильтровывали от раствора и высушивали на воздухе. Затем каждую серию исследовали, используя рентгенофазовый анализ, методы позитронно-аннигиляционной спектроскопии и сканирующей электронной микроскопии.

Методом сканирующей электронной микроскопии также исследованы растворы антибиотиков с концентрациями 0,02 и 0,04 мг/мл. Съемка образцов проводилась на кремниевой подложке.

Результаты исследования

Исследование сорбции антибиотиков вермикулитом методом рентгенофазового анализа (РФА).

РФА проводился для уточнения механизма сорбции антибиотиков, так как данный метод позволяет увидеть изменения в строении алюмосиликата.

При сравнении спектров РФА исходного вермикулита и вермикулита с адсорбированными на нем антибиотиками обнаруживается увеличение межслоевого расстояния на 0,12, 0,11, 0,14 и 0,17 Å для левомицетина, тетрациклина, цефазолина и ципрофлоксацина соответственно (рисунки 1 и 2). Изменение межслоевого расстояния указывает на то, что в межслоевое пространство алюмосиликата интеркалирует антибиотик, раздвигая слои алюмосиликата. Кроме того, обнаруживается появление дополнительного пика для всех исследуемых антибиотиков, кроме тетрациклина. Появление нового пика свидетельствует об изменении в кристаллической структуре алюмосиликата, что позволяет выдвинуть предположение, что сорбция идет не только за счет интеркаляции, но и за счет других механизмов. Поверхностная сорбция происходит за счет формирования комплексов между антибиотиком и ионами металлов в межслоевом пространстве. Таким образом можно оценивать степень сорбционной емкости и количество используемого препарата.

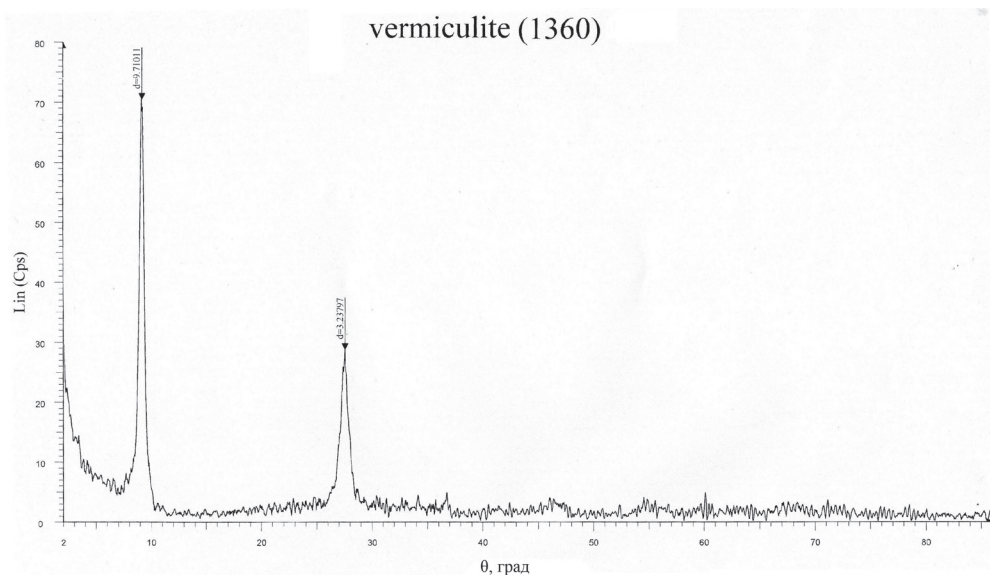


Рис. 1. Дифрактограмма исходного вермикулита.

Fig. 1. Diffractogram of initial vermiculite.

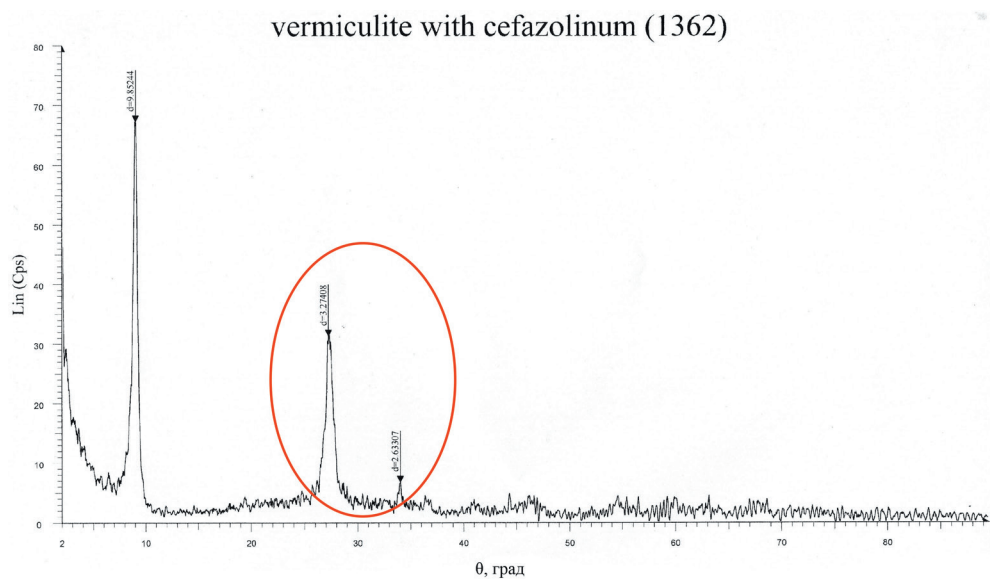


Рис. 2. Дифрактограмма исходного вермикулита с нанесенным цефазолином.

Fig. 2. Diffractograms of vermiculite with cefazolin.

Исследование сорбции антибиотиков вермикулитом методом позитронно-аннигиляционной спектроскопии

На основании данных позитронно-аннигиляционной спектроскопии (таблицы 1 и 2) были рассчитаны объемы ловушек для вермикулита с адсорбированными на нем антибиотиками (левомицетином, тетрациклином и цефазолином). Так как позитроний (Ps) образуется в пустотах, то удельный объем (V_{ps}) зависит от объема пор.

Таблица 1

Экспериментальные данные позитронно-аннигиляционной спектроскопии
Experimental data of positron-annihilation spectroscopy

Образец	Параметры позитронной аннигиляции							
	τ_1 , нс	τ_2 , нс	τ_3 , нс	I_1 , %	I_2 , %	I_3 , %	K_2 , 1/нс	K_3 , 1/нс
Вермикулит исходный	0,141	0,300	0,963	61,48	36,80	1,72	137,42	10,38
Вермикулит с водой	0,152	0,341	1,010	70,83	27,57	1,61	99,58	8,93
Вермикулит с левомицетином	0,152	0,339	1,103	69,02	29,86	1,12	108,68	6,34
Вермикулит с тетрациклином	0,168	0,319	0,957	73,03	25,32	1,64	71,11	8,04
Вермикулит с цефазолином	0,147	0,355	0,833	71,12	27,60	1,29	109,48	7,19

Примечания: τ_i — время жизни позитрония; I_i — интенсивность; $i = 2, 3$; $K_i = I_i \cdot (1/\tau_j - 1/\tau_i)$ — константа скорости реакции.

Таблица 2

Рассчитанные данные позитронно-аннигиляционной спектроскопии
Calculated positron annihilation spectroscopy data

Образец	N_{ps} , *1E 20	N_{e^+} , *1E 20	RPS лов.	R_{e^+} лов.	V_{ps}	V_{e^+}	V_{ps}	V_{e^+}
	1/sm ³	1/sm ³	Å	Å	rel. vol.	rel. vol.	norm. vol.	norm. vol.
Вермикулит исходный	8,40	74,69	4,78	4,36	0,383	2,585	0,129	0,871
Вермикулит с водой	6,68	54,34	4,79	4,34	0,308	1,864	0,142	0,858
Вермикулит с левомицетином	4,70	58,15	4,86	4,34	0,226	1,997	0,102	0,898
Вермикулит с тетрациклином	6,20	38,36	4,67	4,37	0,265	1,340	0,165	0,835
Вермикулит с цефазолином	5,37	59,31	4,67	4,34	0,229	2,029	0,101	0,899

Примечания: N_{ps} — число соударений позитрония; N_{e^+} — число соударений позитрона; R_{ps} — радиус ловушки для позитрония; R_{e^+} — радиус ловушки для позитрона; V_{ps} — объем позитрония; V_{e^+} — объем позитрона.

Расчет объема ловушек производился по формуле:

$$V_{л} = V_{ps} / N_{ps}$$

где V_{ps} — объем позитрония (в относительных единицах); N_{ps} — число соударений позитрония.

Рассчитанные объемы ловушек составляют 153,6, 212,6, 217, 266,1, 188,1 Å для исходного вермикулита, вермикулита с левомицетином, вермикулита с тетрациклином, вермикулита с цефазолином и вермикулита с ципрофлоксацином соответственно. Наибольшее изменение объема ловушки происходит при сорбции цефазолина, что говорит о большом размере молекулы антибиотика. Увеличение объемов ловушек по сравнению с исходным вермикулитом подтверждает предположение об интеркаляции антибиотиков в межслоевое пространство алюмосиликатов, что также является основанием для количественной оценки соотношения сорбент:сорбат.

Исследования сорбции антибиотиков вермикулитом методом сканирующей электронной микроскопии

При изучении полученных снимков вермикулита без нанесенных антибиотиков было обнаружено, что в составе сорбента присутствуют как сферические частицы, так и частицы с плоским слоистым строением (рисунки 3, 4), что связано с природным происхождением сорбента. При этом, сферические частицы практически идентичны слоистым по элементному анализу, что представлено в табл. 3, соответственно существенных различий в сорбционной емкости отмечаться не будет.

Эксперименты [7, 10, 13] показали, что вермикулиты имеют лучшие сорбционные свойства по сравнению с другими группами алюмосиликатов. При их использовании достигается максимальное удаление антибиотиков из раствора. Проведенные исследования показывают, что природа материала не окажет существенного влияния на поглонительную способность. Данный факт следует учитывать при выборе сорбента для очистки содержащих антибиотики вод.

Таблица 3

Данные элементного анализа химических веществ
(спектр 1 соответствует сферической частице, спектр 2 — слоистой)

Elemental analysis of chemicals data
(spectrum 1 corresponds to spherical particle, spectrum 2 — layered)

Образец	Элементы в составе, в атомных %							
	C	O	F	Mg	Al	Si	Cl	Fe
Спектр 1	4,02	68,10	1,29	2,11	1,51	22,07	0,90	–
Спектр 2	4,37	59,48	–	11,42	1,17	15,41	1,19	6,97

Как показано на рис. 5, при увеличении поверхности до нескольких сотен нанометров, и слоистые и сферические частицы имеют пористое строение. Такая структура также способствует увеличению сорбционной поверхности, а значит, показывает более эффективные результаты.

При сравнении снимков исходного вермикулита и вермикулита с нанесенными на него антибиотиками (рисунки 5—7) показано, что происходит изменение его поверхности. Для образцов с нанесенными антибиотиками наблюдается уменьшение количества пор и образование «наплывов» на поверхности частицы алюмосиликата (рис. 6). Образование «наплывов» происходит вследствие аморфной структуры антибиотиков левомицетина и тетрациклина, соответственно, емкость снижается.

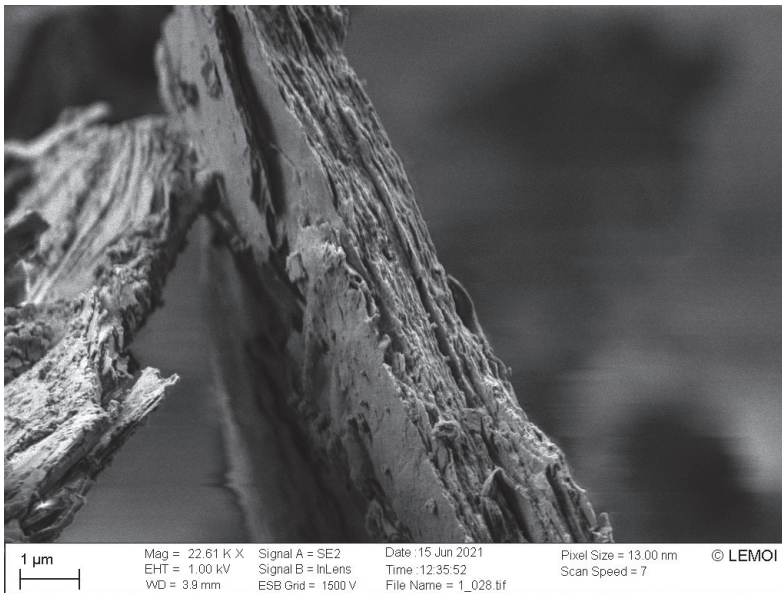


Рис. 3. Слоистые частицы в составе сорбента на основе вермикулита.

Fig. 3. Layered particles in the composition of the sorbent based on vermiculite.

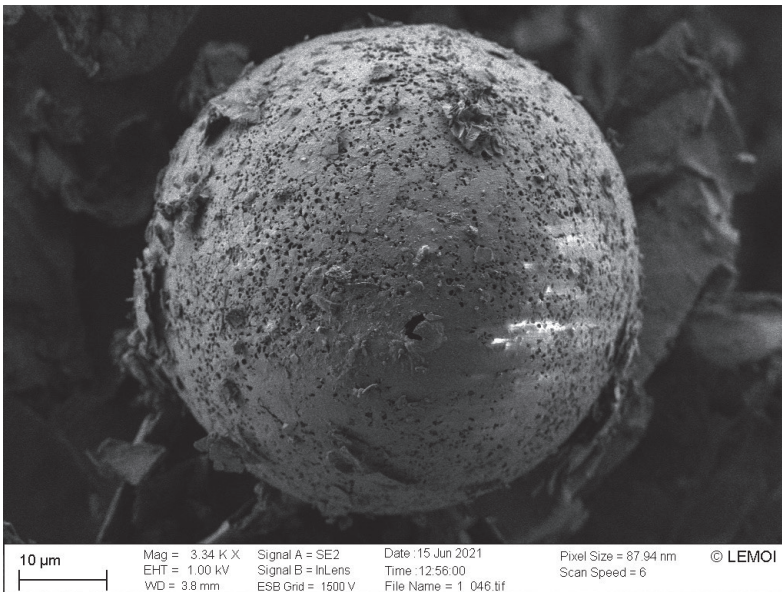


Рис. 4. Сферические частицы в составе сорбента на основе вермикулита.

Fig. 4. Spherical particles in the composition of the sorbent based on vermiculite.

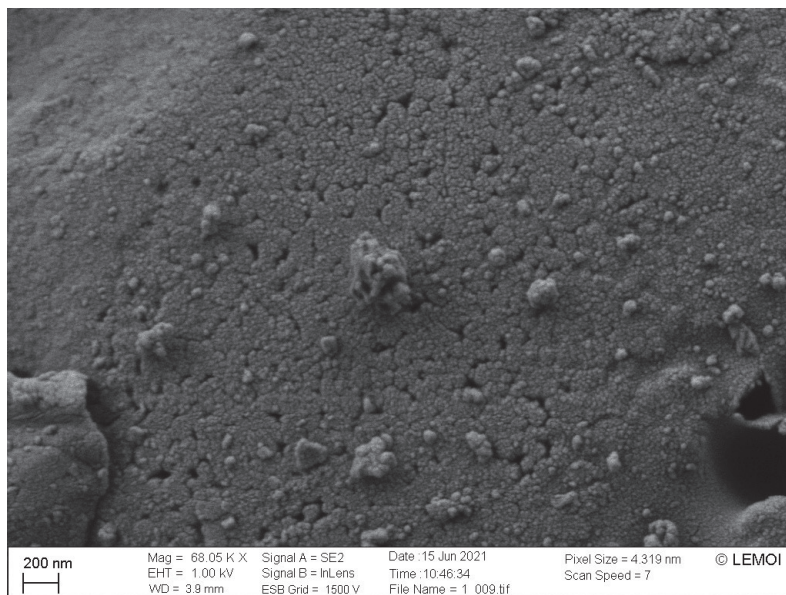


Рис. 5. Снимок поверхности алюмосиликата.

Fig. 5. A snapshot of the aluminosilicate surface.

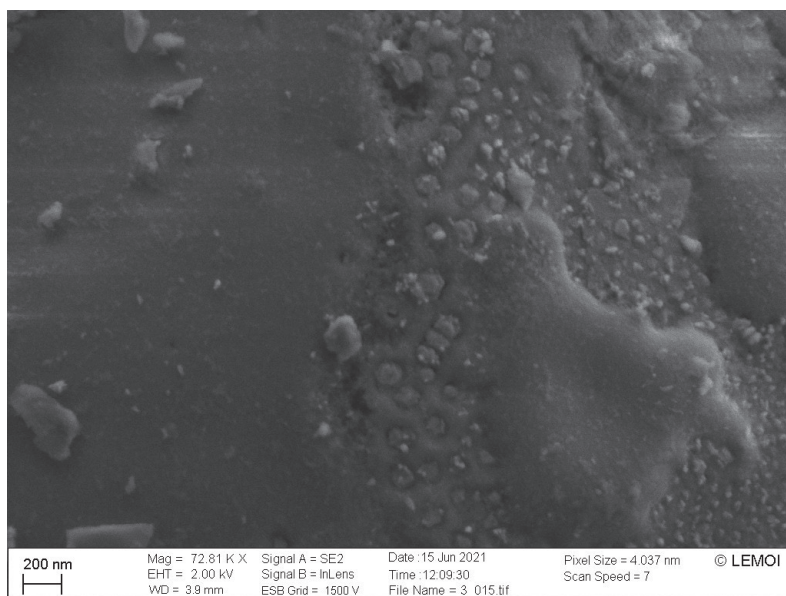


Рис. 6. Поверхность вермикулита с нанесенным тетрациклином.

Fig. 6. Surface of vermiculite with tetracycline.

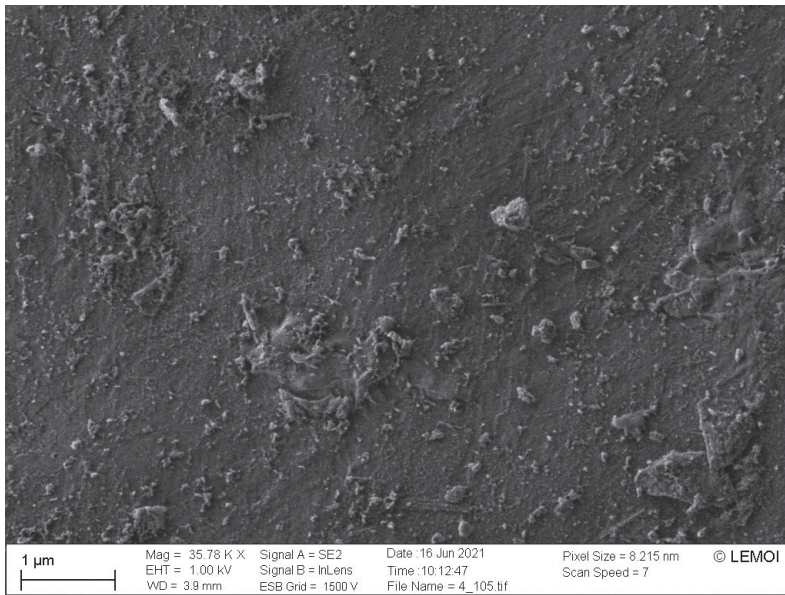


Рис. 7. Поверхность вермикулита с нанесенным цефазолином.

Fig. 7. Surface of vermiculite with cefazolin.

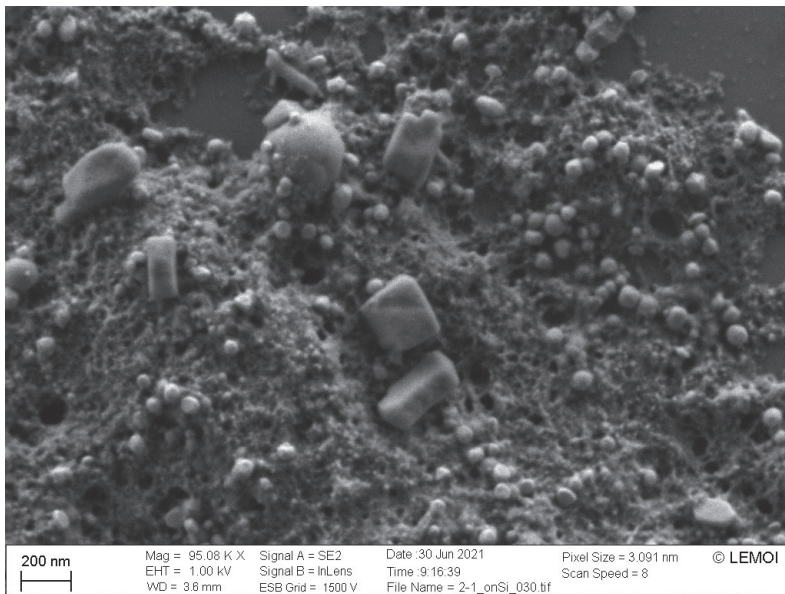


Рис. 8. Поверхность цефазолина на кремниевой подложке.

Fig. 8. Cefazoline surface on silicon substrate.

При этом, в некоторых случаях, для вермикулита с нанесенными цефазолином и ципрофлоксацином наблюдается появление пор крупного размера и правильной формы, что связано со структурой антибиотика. На рис. 8 показано, что для данных антибиотиков в растворе характерно образование кристаллов правильной формы. Таким образом, в процессе сорбции, при попадании в поры алюмосиликата, антибиотик может образовывать кристаллы, которые изменяют размер и форму пор. Затем кристалл растворяется, оставляя поры в измененном виде, что также влияет на эффективность очистки. Оценив скорость формирования кристаллов, можно рассчитать тенденции изменения эффективности очистки загрязненных вод.

Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что сорбция антибиотиков происходит не только за счет интеркаляции, что подтверждается данными рентгенофазового анализа, но и за счет поверхностных взаимодействий и физической сорбции, что подтверждают исследования, проведенные методами позитронно-аннигиляционной спектроскопии и сканирующей электронной микроскопии. Таким образом, данные методы следует использовать для оценки сорбции материалов аналогичных классов. Получаемые при этом показатели ложатся в основу расчета количества материала, применяемого для очистки содержащих антибиотики сточных вод, степени его эффективности для различных групп антибиотиком и частоты его замены.

Список источников

1. Басов В. Н., Бахирева О. И., Вольхин В. В., Пан Л. С. Синтез сорбционных материалов на основе вермикулита и микроорганизмов для извлечения ионов и радионуклидов стронция // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 2. С. 48—52.
2. Бахирева О. И., Пан Л. С., Вольхин В. В., Белякова О. В., Федорова М. С. Синтез и использование сорбционных материалов на основе вермикулита и микроорганизмов для извлечения стронция // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2010. № 11. С. 150—156.
3. Sari A., Tüzen M. Adsorption of silver from aqueous solution onto raw vermiculite and manganese oxide-modified vermiculite // Microporous and Mesoporous Materials. 2013. Vol. 170. P. 155—163.
4. Suzuki N., Ozawa S., Ochi K., Chikuma T., Watanabe Yu. Approaches for cesium uptake by vermiculite // Journal of Chemical Technology and Biotechnology. 2013. Vol. 88, No 9. P. 1603—1605.
5. Holešová S., Štembírek J., Bartošová L., Pražanová G., Valášková M., Samlíková M., Pazdziora E. Antibacterial efficiency of vermiculite-chlorhexidine nanocomposites and results of the in vivo test of harmlessness of vermiculite // Materials Science and Engineering C. 2014. Vol. 42. P. 466—473.
6. Dos Anjos V. E., Rohwedder J. R., Cadore S., Abate G., Grassi M. T. Montmorillonite and vermiculite as solid phases for the preconcentration of trace elements in natural waters: Adsorption and desorption studies of As, Ba, Cu, Cd, Co, Cr, Mn, Ni, Pb, Sr, V, and Zn // Applied Clay Science. 2014. Vol. 99. P. 289—296.
7. Соколова Л. И., Гальченко Д. С., Смирнова М. Г., Блиновская Я.Ю. Использование природных алюмосиликатов для очистки сточных вод от антибиотиков различных классов // Гидрометеорология и экология. 2021. № 62. С. 113—125.

8. Белюстова К. О., Соколова Л. И. Определение содержания левомицетина в пищевых продуктах с различной массовой долей жира // Техника и технология пищевых производств. 2011. Т. 3, № 22. С. 107—111.
9. Белюстова К. О., Шапкин Н. П., Соколова Л. И., Привар Ю. О. Применение природных алюмосиликатов месторождений приморского края для концентрирования антибиотиков левомицетина и тетрациклина // Евразийский Союз Ученых. 2014. Т. 5, № 3. С. 154—156.
10. Привар Ю. О., Соколова Л. И., Белюстова К. О., Шапкин Н. П. Применение природных алюмосиликатов месторождений Приморского края для концентрирования антибиотиков левомицетина и тетрациклина // Современные концепции научных исследований. Сборник трудов V Международной научно-практической конференции. М., 2014. С. 145—146.
11. Соколова Л. И., Шапкин Н. П., Белюстова К. О. Патент № 2431829 — Способ определения содержания левомицетина в пищевых продуктах и сорбент для его осуществления. 2010.
12. Чучалина И. В., Соколова Л. И., Земнухова Л. А. Концентрирование цефалоспориновых антибиотиков на природных сорбентах // Исследовано в России. 2006. С. 1851—1842.
13. Шапкин Н. П., Шкуратов А. Л., Разов В. И., Золотарь Р. Н., Рассказов В. А., Соколова Л. И., Жамская Н. Н., Каткова, С.А. Хальченко И. Г. Химическая модификация алюмосиликатов и исследование их физико-химических свойств // Журнал неорганической химии. 2014. Т. 59, № 9. С. 1—6.
14. Шапкин Н. П., Разов В. И., Хальченко И. Г., Короченцев В. Г. Исследование строения модифицированных вермикулитов различными физико-химическими методами // Химическая промышленность сегодня. 2014. № 9. С. 10—18.
15. Privar Yu. O., Sokolova L. I., Belyustova K. O., Shapkin N. P., Kolycheva V. B. The application of natural aluminosilicate minerals of Primorsky region for the isolation of chloramphenicol and tetracycline antibiotics from a multicomponent food product matrix // Proceedings of the academic conference in English of school of natural science students. 14—15 March 2014. P. 59.

References

1. Basov V. N. Bakhireva O. I., Vol'khin V. V., Pan L. S. Synthesis of sorption materials based on vermiculite and microorganisms for extracting strontium ions and radionuclides. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzhia = Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region*. 2012;(2): 48—52. (In Russ.).
2. Bakhireva O. I., Pan L. S., Vol'khin V. V., Belyakova O. V., Fedorova M. S. Synthesis and using of sorption materials based on vermiculite and microorganisms for strontium extraction. *Vestnik Permskogo natsionalnogo polytechnicheskogo universiteta. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya = Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Chemical technology and biotechnology*. 2010;(11):150—156.
3. Sari A., Tüzen M. Adsorption of silver from aqueous solution onto raw vermiculite and manganese oxide-modified vermiculite. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2013;(170):155—163.
4. Suzuki N., Ozawa S., Ochi K., Chikuma T., Watanabe Yu. Approaches for cesium uptake by vermiculite. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 2013;88(9):1603—1605.
5. Holešová S., Štembírek J., Bartošová L., Pražanová G., Valášková M., Samlíková M., Pazdziora E. Antibacterial efficiency of vermiculite-chlorhexidine nanocomposites and results of the in vivo test of harmlessness of vermiculite. *Materials Science and Engineering C*. 2014;(42):466—473.
6. Dos Anjos V. E., Rohwedder J. R., Cadore S., Abate G., Grassi M. T. Montmorillonite and vermiculite as solid phases for the preconcentration of trace elements in natural waters: Adsorption and desorption studies of As, Ba, Cu, Cd, Co, Cr, Mn, Ni, Pb, Sr, V, and Zn. *Applied Clay Science*. 2014;(99):289—296.
7. Sokolova L. I., Gal'chenko D. S., Smirnova M. G., Blinovskaya Ya. Yu. Using of natural aluminosilicates for clean wastewater from antibiotics various classes. *Gidrometeorologia i ekologiya = Hydrometeorology and ecology*. 2021;(62):113—125. (In Russ.).
8. Belyustova K. O., Sokolova L. I. Determination of levomycetine content in foodstuffs with different weight fractions of fat. *Technika i tekhnologiya pischevykh produktov = Technique and technology of food production*. 2011;3(22):107—111. (In Russ.).

9. Belyustova K. O., Shapkin N. P., Sokolova L. I., Privar Yu. O. Using of natural aluminosilicates of deposits of the coastal region for concentration of antibiotics levomycetine and tetracycline. *Evrasiyskiy soyuz uchenshv = Eurasian Union of Scientists*. 2014;5(3):154—156. (In Russ.).
10. Privar Yu. O., Sokolova L. I., Belyustova K. O., Shapkin N. P. Using of natural aluminosilicates of Primorsky Krai deposits for concentration of levomycetine and tetracycline antibiotics. *Sovremennye koncepcii nauchnykh issledovaniy. Sbornik trudov V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Modern concepts of scientific research. Collection of works of the V International Scientific and Practical Conference*. Moscow, 2014:145—146. (In Russ.).
11. Sokolova L. I., Shapkin N. P., Belyustova K. O. Patent № 2431829 – Method for determination of levomycetine content in food products and sorbent for its implementation. 2010. (In Russ.).
12. Chuchalina I. V., Sokolova L. I., Zemnukhova L. A. Concentration of cephalosporin antibiotics on natural sorbents. *Issledovano v Rossii = Investigated in Russia*. 2006:1851—1842. (In Russ.).
13. Shapkin N. P., Shkuratov A. L., Razov V. I., Zolotar R. N., Rasskazov B. A., Sokolova L. I., Zham-skaya N. N., Katkova S. A., Khal'chenko I. G. Chemical modification of aluminosilicates and study of their physicochemical properties. *Zhurnal neorganicheskoy khimii = Journal of Inorganic Chemistry*. 2014;59(9):1—6. (In Russ.).
14. Shapkin N. P., Razov V. I., Khal'chenko I. G., Korochentsev V. G. Study of the structure of modified vermiculites by various physicochemical methods. *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya = Chemical industry today*. 2014;(9):10—18. (In Russ.).
15. Privar Yu. O., Sokolova L. I., Belyustova K. O., Shapkin N. P., Kolycheva V. B. The application of natural aluminosilicate minerals of Primorsky region for the isolation of chloramphenicol and tetracycline antibiotics from a multicomponent food product matrix. *Proceedings of the academic conference in English of school of natural science students*. 14—15 March 2014:59.

Сведения об авторах

Гальченко Дарья Сергеевна, аспирант департамента химии и материалов Института наукоемких технологий и передовых материалов, Дальневосточный федеральный университет, galchenko_ds@mail.ru.

Сokolova Лариса Ивановна, канд. хим. наук, профессор департамента химии и материалов Института наукоемких технологий и передовых материалов, директор Эколого-аналитического центра, Дальневосточный федеральный университет, sokolova.li@dvfu.ru.

Ткачев Владимир Вадимович, канд. физ.-мат. наук, доцент департамента теоретической физики и интеллектуальных технологий Института наукоемких технологий и передовых материалов, Дальневосточный федеральный университет, tkachev.vv@dvfu.ru.

Шапкин Николай Павлович, д-р хим. наук, профессор департамента химии и материалов Института наукоемких технологий и передовых материалов, Дальневосточный федеральный университет, shapkin.np@dvfu.ru.

Разов Валерий Иванович, канд. физ.-мат. наук, доцент департамента теоретической физики и интеллектуальных технологий Института наукоемких технологий и передовых материалов, Дальневосточный федеральный университет, razov.vi@dvfu.ru.

Блиновская Яна Юрьевна, д-р техн. наук, профессор департамента природно-технических систем и техносферной безопасности Политехнического института, Дальневосточный федеральный университет, blinovskaia.iaiu@dvfu.ru.

Information about authors

Daria S. Gal'chenko, post-graduate student of Chemistry and Materials Department of the Institute of Science-Intensive Technologies and Advanced Materials, Far Eastern Federal University.

Larisa I. Sokolova, PhD (Chem. Sci.), Professor, Chemistry and Materials Department of the Institute of Science-Intensive Technologies and Advanced Materials, director of Ecological and Analytical Centre, Far Eastern Federal University.

Д. С. ГАЛЬЧЕНКО, Л. И. СОКОЛОВА, В. В. ТКАЧЕВ и др.

Vladimir V. Tkachev, PhD (Phys.-Math. Sci.), Associate Professor, Department of Theoretical Physics and Intelligent Technology of the Institute of Science-Intensive Technologies and Advanced Materials, Far Eastern Federal University.

Nikolay P. Shapkin, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Chemistry and Materials Department of the Institute of Science-Intensive Technologies and Advanced Materials, Far Eastern Federal University.

Valeriy I. Razov, PhD (Phys.-Math. Sci.), Associate Professor, Department of Theoretical Physics and Intelligent Technology of the Institute of Science-Intensive Technologies and Advanced Materials, Far Eastern Federal University.

Yana Yu. Blinovskaya, Dr. Sci. (Tech.), Professor of natural and technical system and technosferical safety Polytechnical institute, Far Eastern Federal University.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 26.03.2022.

Принята к публикации после доработки 26.07.2022.

The article was received on 26.03.2022.

The article was accepted after revision on 26.07.2022.

Гидрометеорология и экология. 2022. № 68. С. 508—524.
Hydrometeorology and Ecology. 2022;(68):508—524.

ГЕОИНФОРМАТИКА

Научная статья

УДК 004.032.26:[551.43+551.50+504](282.256.17)

doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-508-524

Геоинформационная процедура оценки региональной ситуации на основе оперативного ИНС-анализа гидрометеорологической и экологической информации (на примере Обской губы)

***Сергей Иванович Биденко¹, Игорь Сергеевич Храмов²,
Александр Александрович Бенгерт³,
Ирина Сергеевна Мучкаева⁴***

¹ ПАО «Интелтех», Санкт-Петербург, VidenkoSI@inteltech.ru

² ГКУ Тверской области «Центр информационных технологий», Тверь

³ ФГУП «Гидрографическое предприятие», Санкт-Петербург

⁴ ФКГУ «9-й Отряд Федеральной противопожарной службы по Санкт-Петербургу», Санкт-Петербург

Аннотация. Проанализированы физико-географические и социально-географические условия акватории и района Обской губы как составной части Арктической зоны Российской Федерации. Определены направления использования геоинформационных моделей и методов представления и использования пространственных данных для поддержки управления территориальной хозяйственной активностью в Арктике. Предложена основанная на искусственных нейронных сетях (ИНС) модель геоданных, содержащая минимально необходимый для пространственного анализа набор территориальных параметров. Выполнено решение задачи качественного оценочного анализа навигационно-гидрографической и экологической обстановки в районе Обской губы, являющейся типовой задачей классификации для искусственной нейронной сети.

Ключевые слова: морская территориальная активность, геоинформационная поддержка управления, геоэкология, искусственные нейронные сети, модель территориальной обстановки.

Для цитирования: Биденко С. И., Храмов И. С., Бенгерт А. А., Мучкаева И. С. Геоинформационная процедура оценки региональной ситуации на основе оперативного ИНС-анализа гидрометеорологической и экологической информации (на примере Обской губы) // Гидрометеорология и экология. 2022. № 68. С. 508—524. doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-508-524.