



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 543.054:547.466

doi: 10.17308/sorpchrom.2025.25/13052

Сорбция антибиотиков цефалоспоринового ряда молекулярно-импринтированными полимерами

Фам Тхи Гам^{1,2}, Александр Николаевич Зяблов^{1✉},
Као Ньят Линь³, Нгуен Ань Тиен⁴

¹Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия, alex-n-z@yandex.ru[✉]

²Ханойский университет бизнеса и технологий, Ханой, Вьетнам

³Приморское отделение Совместного Российско-Вьетнамского тропического научно-исследовательского и технологического центра, Нячанг, Вьетнам

⁴Педагогический университет Хошимина, Хошимин, Вьетнам

Аннотация. В последние годы молекулярно-импринтированные полимеры (МИП) привлекли большое внимание благодаря своей способности к селективному распознаванию и сорбции целевых молекул. Однако эффективность адсорбции МИП зависит от множества факторов в процессе синтеза. Поэтому необходимо изучить адсорбционные способности молекулярно-импринтированных полимеров. В данной работе были получены полимеры с молекулярным отпечатком антибиотиков цефтриаксона натрия (Ceftr) и цефазолина натрия (Cef). Эти полимеры были получены путем перестройки и имидизации полиацидных цепей в N,N-диметилформамиде в присутствии молекул антибиотиков в качестве шаблонов. Для оценки их сорбционной способности применен метод прямой кондуктометрии. Изотермы сорбции обоих антибиотиков относятся к типу L, характерному для мономолекулярной сорбции. Сильное взаимодействие полимера с антибиотиками приводит к быстрому заполнению пор даже при низких концентрациях. Примечательно, что на начальной области изотермы количество сорбированного вещества линейно увеличивается с увеличением концентрации раствора. По мере дальнейшего повышения концентрации процесс сорбции достигает насыщения, что указывает на предельный уровень сорбции. Анализ кривых кинетики сорбции показал, что время установления равновесия для цефтриаксона натрия составляет 40 минут, а для цефазолина натрия – 55 минут. Несмотря на отсутствие целевых молекул Ceftr и Cef при синтезе неимпринтированного полимера (НП), он способен удерживать вещества благодаря функциональным мономерам, которые образуют водородные связи с этими веществами на поверхности полимера. Однако из-за отсутствия молекулярного импринтинга молекулы антибиотиков лишь частично удерживаются на поверхности НП, что снижает его сорбционную способность по сравнению с МИП. Максимальные значения сорбции для МИП-Сeftr и МИП-Сef достигают 5.15 и 13.05 мг/г соответственно. Особый интерес представляет сравнение сорбционной способности МИП-Сef и МИП-Сeftr. МИП-Сef обладает лучшей сорбционной способностью по сравнению с МИП-Сeftr.

Ключевые слова: антибиотик, цефтриаксон натрия, цефазолин натрия, молекулярно-импринтированные полимеры, сорбция, импринтинг-фактор.

Для цитирования: Гам Фам Тхи, Зяблов А.Н., Линь Као Ньят, Тиен Нгуен Ань Сорбция антибиотиков цефалоспоринового ряда молекулярно-импринтированными полимерами // Сорбционные и хроматографические процессы. 2025. Т. 25, № 3. С. 436-443. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/13052>

Original article

Sorption of cephalosporin antibiotics by molecularly imprinted polymers

Pham Thi Gam^{1,2}, Alexander N. Zyablov^{1✉}, Cao Nhat Linh³, Nguyen Anh Tien⁴

¹Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation

²Hanoi University of Business and Technology, Hanoi, Vietnam



³Coastal Branch of the Joint Vietnam-Russia Tropical Science and Technology Research Center, Nha Trang, Vietnam

⁴Ho Chi Minh City University of Education, Ho Chi Minh City, Vietnam

Abstract. In recent years, molecularly imprinted polymers (MIPs) have attracted much attention due to their ability to selectively recognize and sorb target molecules. However, the adsorption efficiency of MIPs depends on many factors during the synthesis process. Therefore, it is necessary to study the adsorption abilities of molecularly imprinted polymers. In this work, polymers with a molecular imprint of the antibiotics ceftriaxone sodium (Ceftr) and cefazolin sodium (Cef) were obtained. These polymers were obtained by rearrangement and imidization of polyacid chains in N,N-dimethylformamide in the presence of antibiotic molecules as templates. Direct conductometry was used to evaluate their sorption capacity. Sorption isotherms of both antibiotics are of the L type, which is characteristic of monomolecular sorption. Strong interaction of the polymer with antibiotics leads to rapid filling of pores even at low concentrations. It is noteworthy that in the initial region of the isotherm, the amount of the sorbed substance increases linearly with increasing concentration of the solution. As the concentration further increases, the sorption process reaches saturation, which indicates the maximum sorption level. Analysis of the sorption kinetics curves showed that the equilibrium time for ceftriaxone sodium is 40 minutes, and for cefazolin sodium – 55 minutes. Despite the absence of target Ceftr and Cef molecules during the synthesis of non-imprinted polymer (NP), it is able to retain substances due to functional monomers that form hydrogen bonds with these substances on the polymer surface. However, due to the lack of molecular imprinting, antibiotic molecules are only partially retained on the NP surface, which reduces its sorption capacity compared to MIP. The maximum sorption values for MIP-Ceftr and MIP-Cef reach 5.15 and 13.05 mg/g, respectively. Of particular interest is the comparison of the sorption capacity of MIP-Cef and MIP-Ceftr. MIP-Cef has better sorption capacity compared to MIP-Ceftr.

Keywords: antibiotic, ceftriaxone sodium, cefazolin sodium, molecularly imprinted polymers, sorption, imprinting factor.

For citation: Pham Thi Gam, Zyablov A.N., Cao Nhat Linh, Nguyen Anh Tien Sorption of cephalosporin antibiotics by molecularly imprinted polymers. *Sorbtionnye i khromatograficheskie protsessy. 2025. 25(3): 436-443. (In Russ.).* <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/13052>

Введение

Термин «антибиотик» обычно используется для обозначения широкого спектра природных, полусинтетических или синтетических соединений, обладающих антибактериальной активностью [1]. Антибиотики могут применяться для лечения или подавления инфекционных заболеваний, вызванных патогенными бактериями [2]. Кроме того, их часто используют в животноводстве для ускорения роста сельскохозяйственных животных [3].

Однако чрезмерное использование антибиотиков в животноводстве приводит к накоплению остаточных веществ в тканях и экскрементах животных, что впоследствии загрязняет окружающую среду и вызывает контаминацию различных продуктов питания, таких как говядина, свинина, баранина, молоко, яйца и мед [4]. Длительное и регулярное воздействие низких доз этих соединений на человека представляет собой серьезную проблему

для общественного здравоохранения, поскольку связано с рядом нарушений, включая дисбаланс кишечной микрофлоры, аллергические реакции, мутации, тератогенные эффекты, онкологические заболевания, а также с появлением устойчивых к антибиотикам и множественно устойчивых бактериальных штаммов. Это может привести к вспышкам трудноизлечимых инфекций, против которых современные антибиотики окажутся неэффективными, что повлечёт за собой тяжелые последствия для пациентов и увеличит затраты на медицинское обслуживание. Кроме того, антибиотики, попадая в окружающую среду, могут загрязнять почву и водные ресурсы, создавая значительные экологические риски. Поэтому крайне важно уделять особое внимание контролю за использованием и управлением антибиотиками с целью защиты здоровья человека и экологического баланса [1, 2, 5].



В настоящее время разработано множество методов анализа остаточных количеств антибиотиков, включая спектрофотометрические, флуориметрические, хемилюминесцентные, хроматографические, электрохимические и другие методы [6-10]. Однако, несмотря на эффективность этих методов, их использование часто сопряжено со сложными процедурами, требующими специализированной обработки и длительное время выполнения. Постоянное развитие технологий, наряду с растущей потребностью в быстрых, экономически эффективных, чувствительных и селективных методах обнаружения антибиотиков, способствовало разработке амперометрических сенсоров. Селективность таких сенсоров достигается за счет модификации поверхности их электродов различными селективными материалами. Одним из перспективных материалов для усовершенствования сенсоров являются молекулярно-импринтированные полимеры [11, 12].

Молекулярно-импринтированные полимеры рассматриваются как «имитаторы антител» и привлекают все большее внимание благодаря своим выдающимся преимуществам, включая высокую селективность и чувствительность, низкий предел обнаружения, а также исключительную стабильность, низкую стоимость производства и возможность многократного использования [13]. За последние два десятилетия было опубликовано множество исследований, обзорных статей и других научных публикаций, подтверждающих широкое применение МИП в таких областях, как хроматография, катализ, сенсоры, твердофазная экстракция, доставка лекарств, очистка воды и сточных вод, экологический мониторинг и биомедицина [14].

МИП имеют трехмерную структуру с полостями, специфичными для целевого аналита. Для создания таких полимеров могут использоваться различные методы, включая блочную, осадительную, сус-

пензионную и эмульсионную полимеризацию, причем наиболее распространенной является блочная полимеризация [15]. Для получения трехмерной структуры МИП молекулы шаблона, соединяются с функциональными мономерами, образуя предполимерный комплекс. После завершения полимеризации молекулы шаблона удаляются, оставляя полости, готовые к повторному связыванию с целевым аналитом. Большинство взаимодействий между МИП и целевыми молекулами происходит по нековалентному механизму, тогда как ковалентные и полуковалентные взаимодействия используются реже [16].

Цель работы – изучение способности молекулярно-импринтированных и неимпринтированных полимеров на основе полииамида сорбировать антибиотики цефтриаксона натрия и цефазолина натрия из водных растворов.

Экспериментальная часть

Для синтеза полимеров с молекулярными отпечатками антибиотиков была подготовлена полимеризационная смесь, содержащая сополимер 1,2,4,5-бензолтетракарбоновой кислоты и 4,4'-диаминодифенилоксида в N,N-диметилформамиде (ОАО МИПП НПО «Пластик», г. Москва) с добавлением антибиотика в качестве шаблонного соединения. В качестве молекул-шаблонов использовали антибиотики цефтриаксон натрия и цефазолин натрия. Синтез проводили по методике [17-19]. Аналогичным способом, но без добавления антибиотика был получен неимпринтированный полимер.

Сорбцию антибиотиков из водных растворов синтезированными полимерами исследовали на установке (рис. 1). Для определения концентрации антибиотиков в растворах применяли кондуктометр CCT-3320T (Россия) [20].

Стандартные растворы антибиотиков готовили путем растворения точной навески вещества в дистиллированной воде в диапазоне 0.1-0.02 г/дм³. В работе

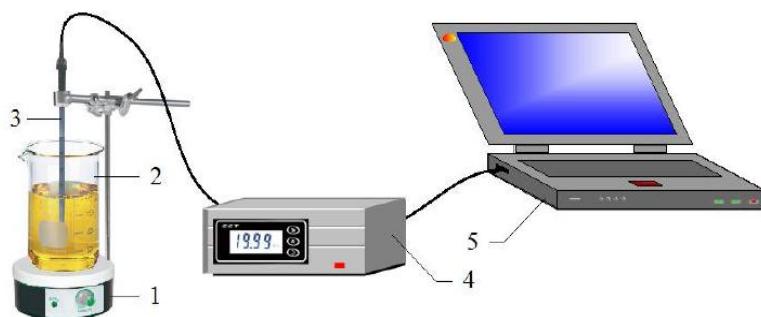


Рис. 1. Схема кондуктометрической установки [20, 21]: 1 – электромагнитная мешалка;

2 – стакан с исследуемым раствором; 3 – электрод; 4 – кондуктометр; 5 – компьютер

Fig. 1. Scheme of conductometric setup [20, 21]: 1 – electromagnetic stirrer; 2 – beaker with test solution; 3 – electrode; 4 – conductometer; 5 – computer

использовали антибиотики квалификации «фармакопейные» производства ОАО «Синтез» (цефтриаксон натрия) и ПАО «Биосинтез» (цефазолин натрия).

Концентрацию устанавливали методом градуировочного графика. Количество сорбированного вещества рассчитывали по формуле [22]:

$$A = \frac{(C_0 - C_{\text{равн}}) \cdot V}{m}, \quad (1)$$

где A – количество сорбированного на поверхности полимера антибиотика мг/г; C_0 – исходная концентрация антибиотика в растворе, г/дм³; $C_{\text{равн}}$ – равновесная концентрация антибиотика в растворе после сорбции, г/дм³; m – масса полимера, г; V – объем раствора, дм³.

Степени извлечения (R , %) высчитывали по уравнению:

$$R, \% = \frac{(C_0 - C) \cdot 100}{C_0}, \quad (2)$$

где C_0 – концентрация антибиотиков в растворе до сорбции, г/дм³; C – концентрация в растворе после сорбции, г/дм³ [17].

Коэффициенты распределения (D) вычисляли по уравнению:

$$D = \frac{R}{(100 - R)} \cdot \frac{V}{m}, \quad (3)$$

где m – масса навески полимера, г; V – объем анализируемого раствора, дм³ [22].

Способность молекулярно-импринтированного полимера с отпечатками антибиотиков распознавать целевые молекулы

оценивали с помощью импринтинг-фактора:

$$IF = \frac{D_{\text{МИП}}}{D_{\text{НП}}}, \quad (4)$$

где $D_{\text{МИП}}$ и $D_{\text{НП}}$ – соответственно коэффициент распределения вещества для молекулярно-импринтированного полимера и неимпринтированного полимера [22].

Обсуждение результатов

В работе исследована способность молекулярно-импринтированных и неимпринтированных полимеров сорбировать антибиотики цефтриаксон натрия и цефазолин натрия из водного раствора. По полученным данным построены кинетические кривые и изотермы сорбции антибиотиков. Для цефтриаксона натрия равновесие устанавливается через 40 минут, а для цефазолина натрия – через 55 минут.

На рисунках 2 и 3 показаны изотермы сорбции антибиотиков Ceftr и Cef полимерами с молекулярными отпечатками на основе полииамида и неимпритированым полимером.

Исследование изотерм сорбции молекулярно-импринтированных и неимпринтированных полимеров показало их схожесть по форме, что свидетельствует о близком механизме сорбции. В частности, при анализе сорбции цефтриаксона натрия и цефазолина натрия полученные кривые сорбции соответствуют изотерме L-типа. Это

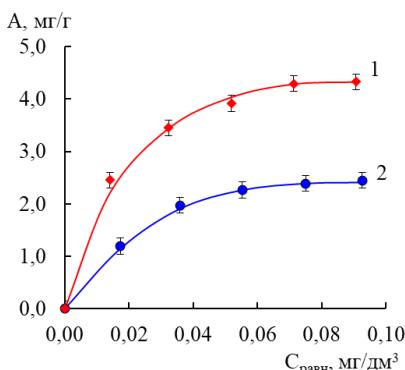


Рис. 2. Изотерма сорбции сорбции цефтриаксона натрия (Ceftr): 1 – МИП-Сефтр; 2 – НП

Fig. 2. Sorption isotherm of sodium ceftriaxone (Ceftr): 1 – MIP-Ceftr; 2 – NP

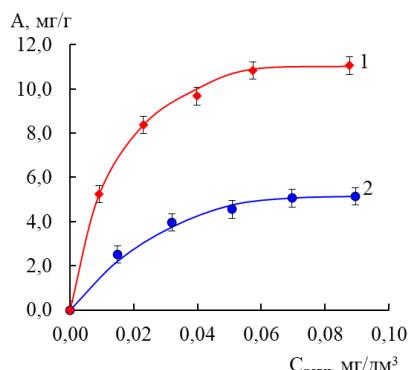


Рис. 3. Изотерма сорбции сорбции цефазолина натрия (Cef): 1 – МИП-Сеф; 2 – НП

Fig. 3. Sorption isotherm of cefazolin sodium (Cef): 1 – MIP-Cef; 2 – NP

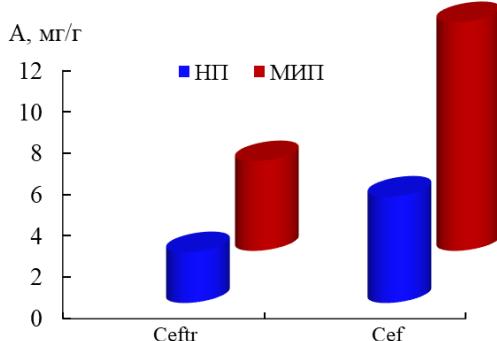


Рис. 4. Количество сорбированных антибиотиков полимерами с отпечатками антибиотиков и неимпринтированным полимером

Fig. 4. The amount of antibiotics sorbed by polymers with antibiotic imprints and non-imprinted polymer

указывает на преимущественное протекание процесса сорбции на микропористой поверхности сорбентов, что характерно для мономолекулярной сорбции [22]. Характерной особенностью этой изотермы является выгнутый начальный участок на графике зависимости адсорбции от концентрации: по мере увеличения числа занятых адсорбционных мест молекулам адсорбтива сложнее находить вакантные позиции [23]. Взаимодействие полимера с молекулами антибиотиков может быть достаточно сильным, что приводит к полному заполнению пор при низких относительных концентрациях [22, 24]. Таким образом в начальной области изотермы наблюдается линейная зависимость адсорбции от концентрации

раствора, а при дальнейшем увеличении концентрации достигается плато, указывающее на предельный уровень сорбции.

Количество антибиотиков, сорбированных МИП и НП, представлено на рисунке 4. Несмотря на то, что НП был синтезирован при отсутствии целевых молекул Ceftr и Cef, он все же способен удерживать молекулы антибиотиков. Это объясняется наличием в его составе функциональных мономеров, таких как 1,2,4,5-бензолтетракарбоновая кислота и 4,4'-диаминодифенилоксид, которые способствуют образованию водородных связей с Ceftr и Cef на поверхности полимера. Однако из-за отсутствия молекулярного импринтинга молекулы антибиотиков не могут проникать

Таблица. Характеристики адсорбции антибиотиков молекулярно-импринтированными (МИП) и неимпринтированными (НП) полимерами ($n=3$, $P=0.95$)

Table. Characteristics of antibiotic adsorption by molecularly imprinted (MIP) and non-imprinted (NP) polymers ($n=3$, $P=0.95$)

Сорбент	Антибиотик	R, %	S _r , %	D, дм ³ /г	S _r , %	IF
НП	Ceftr	12.1 ± 1.1	3.7	0.068 ± 0.007	4.4	2.4
МИП-Сeftr		25.3 ± 1.4	2.2	0.164 ± 0.006	1.5	
НП	Cef	25.5 ± 1.2	1.9	0.169 ± 0.008	1.8	3.4
МИП-Сef		54.3 ± 1.9	1.4	0.574 ± 0.024	1.7	

глубоко в структуру НП, а лишь частично удерживаются на его поверхности, что приводит к более низкой сорбционной способности НП по сравнению с МИП. Максимальное количество сорбированного вещества для МИП-Сeftr и МИП-Сef составляет 5.15 и 13.05 мг/г соответственно.

Для оценки способности молекулярно-импринтированных и неимпринтированных полимеров сорбировать антибиотики рассчитывали степень извлечения ($R, \%$), коэффициент распределения (D) и импринтинг-фактор (IF) (Таблица).

Из таблицы видно, что степень извлечения МИП-Сeftr и МИП-Сef составляет 25.3 и 54.3% соответственно, что выше, чем у НП. Это свидетельствует о высокой селективности МИП по отношению к целевым молекулам антибиотиков. Кроме того, коэффициент распределения импринтированных полимеров также выше, чем у неимпринтированных, что показывает их более высокую сорбционную способность.

Импринтинг-фактор (IF) отражает селективность и сорбционную способность МИП по сравнению с неимпринтированным полимером. Результаты исследования показали, что МИП-Сef имеет IF = 3.4, в то время как МИП-Сeftr достигает всего IF=2.4. Это

Список литературы/References

1. Vicente J.P., García E.P., Chiva J.A., Durbanshi A., Aranda E.O., Broch S.C.,

различие подтверждает, что МИП-Сef обладает лучшими характеристиками как в отношении селективности, так и способности к сорбции по сравнению с МИП-Сeftr.

Заключение

В ходе работы было установлено, что полимеры, импринтированные антибиотиками Сeftr и Сef, обладают лучшей сорбционной способностью по сравнению с неимпринтированными полимерами. В частности, МИП с молекулярным отпечатком цефазолина натрия продемонстрировали наивысшую способность к сорбции. Это открывает перспективы применения молекулярно-импринтированных полимеров на основе полииамида в качестве селективного покрытия для амперометрических сенсоров, что способствует повышению чувствительности и специфичности при обнаружении остатков антибиотиков.

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.

Bose D., Romero J.E. Liquid chromatography, a valuable tool in the determination of antibiotics in biological, food and environmental samples. *Microchemical Journal*.



- 2022; 177: 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2022.107309>
2. Hu J., Ba Y., Pan Z., Li X. Simultaneous determination of 50 antibiotic residues in plasma by HPLC-MS/MS. *Heliyon*. 2024; 10(24): 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40629>
3. Jeon M., Kim J., Paeng K.J., Park S.W., Paeng I.R. Biotin-avidin mediated competitive enzyme-linked immunosorbent assay to detect residues of tetracyclines in milk. *Microchemical Journal*. 2008; 88(1): 26-31. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2007.09.001>
4. Zhang Z., Zhang H., Tian D., Phan A., Seididamyeh M., Alanazi M., Xu Z.P., Sultanbawa Y., Zhang R. Luminescent sensors for residual antibiotics detection in food: Recent advances and perspectives. *Coordination Chemistry Reviews*. 2024; 498: 1-27. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2023.215455>
5. Liang G., Song L., Gao Y., Wu K., Guo R., Chen R., Zhen J., Pan L. Aptamer Sensors for the Detection of Antibiotic Residues-A Mini-Review. *Toxics*. 2023; 11(6): 1-18. <https://doi.org/10.3390/toxics11060513>
6. Buzmakova U.A., Kudryashova O.S. Chemical classification and methods for determining antibiotics. *Bulletin of Perm University. Chemistry*. 2018; 8(1): 6-28. <https://doi.org/10.17072/2223-1838-2018-1-6-28>
7. Alsoveydi A.K.M., Karavaeva O.A., Guliy O.I. Methods and approaches for determining antibiotics. *Antibiotics and chemother.* 2022; 67(1-2): 53-61. <https://doi.org/10.37489/0235-2990-2022-67-1-2-53-61>
8. Ketrusch E.F., Mursalov R.K., Silaev D.V., Rusanova T.Yu. Spectrophotometric determination of some β -lactam antibiotics in their binary mixtures using the method of projections onto latent structures. *Bulletin of the Saratov University. New series. Series: Chemistry. Biology. Ecology*. 2023; 23(4): 392-403. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2023-23-4-392-403>
9. Belova D.D., Kharchenko E.N., Chaplygina O.S. Identification of Residual Traces of Antibiotics in Food. *Journal of Medicinal and Chemical Sciences*. 2022; 5(3): 385-392. <https://doi.org/10.26655/JMCHEMSCI.2022.3.13>
10. Wang J., Ye K.X., Tian Y., Liu K., Liang L.L., Li Q.Q., Huang N., Wang X.T. Simultaneous determination of 22 antibiotics in environmental water samples by solid phase extraction-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *Chinese Journal of Chromatography*. 2023; 41(3): 241-249. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1123.2022.06004>
11. Kalach A. V., Zyablov A. N., Selenmenev V. F. Sensors in the analysis of gases and liquids. Voronezh: LIO. 2011. 240 p. (In Russ.)
12. Yan S., Fang Y., Gao Z. Quartz crystal microbalance for the determination of d-aminozide using molecularly imprinted polymers as recognition element. *Biosensors and Bioelectronics*. 2007; 22(6): 1087-1091. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2006.03.007>
13. Herrera-Chacón A., Cetó X., Valle M. Molecularly imprinted polymers - towards electrochemical sensors and electronic tongues. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2021; 413(24): 6117-6140. <https://doi.org/10.1007/s00216-021-03313-8>
14. Gkika D.A., Tolkou A.K., Lambropoulou D.A., Bikaris D.N., Kokkinos P., Kalavrouziotis I.K., Kyzas G.Z. Application of molecularly imprinted polymers (MIPs) as environmental separation tools. *RSC Applied Polymers*. 2024; 2: 127-148. <https://doi.org/10.1039/D3LP00203A>
15. Middeleer G.D., Dubrule P., Saeger S.D. Characterization of MIP and MIP functionalized surfaces: Current state-of-the-art. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2016; 76: 71-85. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2015.11.007>
16. Li Y., Luo L., Kong Y., Li Y., Wang Q., Wang M., Li Y., Davenport A., Li B. Re-



- cent advances in molecularly imprinted polymer-based electrochemical sensors. *Biosensors and Bioelectronics*. 2024; 249; 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2024.116018>
17. Zyablov A.N., Khalzova S.A., Selenmenev V.F. Sorption of red food colors by molecularly imprinted polymers. *News of universities. Chemistry and chemical technology*. 2017; 60(7): 42-47. <https://doi.org/10.6060/tcct.2017607.5595>
18. Pham Thi Gam, Pham Thi Bich Ngoc, Zyablov A.N. Evaluation of some structural characteristics of films with molecular imprints of antibiotics. *Sorbtionnye i Khromatograficheskie Protsessy*. 2024; 24(6): 1031-1035. <https://doi.org/10.17308/sorpcrom.2024.24/12590> (In Russ.)
19. Zyablov A.N., Nikitskaya L.M., Zhibrova Yu.A. et al. Russian Federation Patent, No. 102264. 2011. (In Russ.)
20. Zyablov A.N., Duvanova O.V. et al. Russian Federation Patent, No. 156900. 2015.
21. Cao Nhat Linh. Diss. Cand. Chem. Sci. (2019). 128 p. (In Russ.)
22. Vu Hoang Yen, Dankovtseva A.G., Zyablov A.N. Analysis of the sorption capacity of polymers with molecular imprints of potassium sorbate. *Collection of works of the 8th International scientific and methodological conference "Pharm Education - 2022"*. 2022: 112-117.

Информация об авторах / Information about the authors

Фам Тхи Гам – аспирант кафедры аналитической химии, Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия; Преподаватель фармацевтического факультета, Ханойский университет бизнеса и технологий, Вьетнам, e-mail: gam_pham@mail.ru

А.Н. Зяблов – д.х.н., профессор кафедры аналитической химии, Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия, e-mail: alex-nz@yandex.ru

Као Ньят Линь – к.х.н., исследователь, Приморское отделение Совместного Российско-Вьетнамского тропического научно-исследовательского и технологического центра, Нячанг, Вьетнам, e-mail: cncnlinh0812@vrtc.org.vn

Нгуен Ань Тиен – к.х.н., доцент, заведующий кафедрой неорганической химии, Педагогический университет Хошимина, Хошимин, Вьетнам, e-mail: tienna@hcmue.edu.vn

Pham Thi Gam – postgraduate student, department of analytical chemistry, Voronezh State University, Voronezh; Lecturer, Faculty of Pharmacy, Hanoi University of Business and Technology, Vietnam, e-mail: gampham@mail.ru

A.N. Zyablov – Dr.Sci. (Chemistry), professor, department of analytical chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: alex-nz@yandex.ru

Cao Nhat Linh – Ph.D. in Chemistry, Researcher, Coastal Branch of the Joint Vietnam-Russia Tropical Science and Technology Research Center, Nha Trang, Vietnam, e-mail: cncnlinh0812@vrtc.org.vn

Nguyen Anh Tien – PhD in Chemistry, Associate Professor, Head of the Inorganic Chemistry Department, Ho Chi Minh City University of Education, Ho Chi Minh City, Vietnam, e-mail: tienna@hcmue.edu.vn

Статья поступила в редакцию 10.04.2025; одобрена после рецензирования 30.06.2025; принята к публикации 06.07.2025.

The article was submitted 30.05.2025; approved after reviewing 30.06.2025; accepted for publication 06.07.2025.