



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 543.054:547.466

doi: 10.17308/sorpchrom.2024.24/12127

Определение 3-(4-гидроксифенил)молочной кислоты амперометрическим сенсором с молекулярно-импринтированными полимерами

**Анастасия Олеговна Коровкина¹, Ву Хоанг Иен^{1,3},
Наталья Владимировна Белобородова², Антон Юрьевич Выборный¹,
Александр Николаевич Зяблов¹✉**

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

²Федеральный научно-клинический центр реаниматологии и реабилитологии, Москва, Россия

³Пищевой Промышленный Университет Хошимина, Вьетнам

Аннотация. Сепсис представляет собой опасную для жизни органную дисфункцию, вызванную нарушением регуляции ответа организма на инфекцию. Если сепсис не распознать на ранней стадии и не начать лечение, он может привести к септическому шоку, полиорганной недостаточности и смерти. Диагностика сепсиса, традиционно основанная на клинической картине и обнаружении этиологически-значимых микроорганизмов в крови и очагах, в последние годы совершенствуется путем поиска и внедрения различных биомаркеров. Одним из перспективных биомаркеров сепсиса является 3-(4-гидроксифенил)молочная кислота (4-ГФМК). В работе разработан амперометрический сенсор, модифицированный полимером с молекулярным отпечатком (ПМО) гидроксифенилмолочной кислоты и показана принципиальная возможность определения 4-ГФМК данным сенсором в модельных водных растворах. Полимеры с молекулярными отпечатками активно используются в процессах разделения веществ, а также при получении селективных сенсоров. Среди многообразия селективных материалов особый интерес представляют полиимиды. Поэтому в работе на основе сополимера 1,2,4,5-бензолтетракарбонной кислоты с 4,4'-диаминодифенилоксидом были разработаны ПМО-сенсоры с отпечатком 4-гидроксифенилмолочной кислоты. Сенсоры получали в две стадии (I – стадия при температуре 80°C, II – стадия при 180°C) методом нековалентного импринтинга. Установлена высокая селективность ПМО-сенсоров по отношению к целевым молекулам. Диапазон определяемых концентраций кислоты составил 0.2-0.0002 мг/дм³. Экспериментально установленный предел обнаружения 4-гидроксифенилмолочной кислоты составил 4.5·10⁻⁵ мг/дм³.

Ключевые слова: полимер с молекулярным отпечатком, 3-(4-гидроксифенил)молочная кислота, 4-ГФМК, сепсис, полиимид, амперометрический сенсор.

Для цитирования: Коровкина А.О., Ву Хоанг Иен, Белобородова Н.В., Выборный А.Ю., Зяблов А.Н. Определение 3-(4-гидроксифенил)молочной кислоты амперометрическим сенсором с молекулярно-импринтированными полимерами // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2024. Т. 24, № 2. С. 227-235. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12127>

Original article

Determination of 3-(4-hydroxyphenyl)lactic acid by an amperometric sensor with molecularly imprinted polymers

**Anastasia O. Korovkina¹, Wu Hoang Yen^{1,3}, Natalia V. Beloborodova²,
Anton Yu. Vybornyi¹, Alexander N. Zyablov¹✉**

¹Voronezh State University, Voronezh, Russia, alex-n-z@yandex.ru✉

²Federal Scientific and Clinical Centre of Resuscitation and Rehabilitation, Moscow, Russia

³Food Industrial University Ho Chi Minh City, Vietnam

Abstract. Sepsis is a life-threatening organ dysfunction caused by the dysregulation of the body's response to infection. If sepsis is not diagnosed early and treated, it can lead to septic shock, multi-organ failure, and death. The diagnosis of sepsis, traditionally relying on clinical findings and detection of aetiologically significant microorganisms in the blood and foci, has been improved in recent years by the search for and implementation of various biomarkers. One promising biomarker of sepsis is 3-(4-hydroxyphenyl)lactic acid (HPLA). In this study, we developed an amperometric sensor modified with a molecularly imprint polymer (MIP) of hydroxyphenyl lactic acid and proved the fundamental possibility of determining HPLA by this sensor in model aqueous solutions. Molecularly imprinted polymers are widely used to separate substances and to produce selective sensors. Among the variety of selective materials, polyimides are of particular interest. Therefore, in this study, we developed MIP sensors imprinted with 4-hydroxyphenyl lactic acid on the basis of copolymer of 1,2,4,5-benzotetracarboxylic acid with 4,4'-diaminodiphenyloxide. The sensors were prepared in two stages (1st stage at 80°C, 2nd stage at 180°C) by non-covalent imprinting method. High selectivity of PMO-sensors towards target molecules was confirmed. The range of the determined concentrations of the acid was 0.2-0.0002 mg/dm³. The experimentally determined detection limit of 4-hydroxyphenyl lactic acid was 4.5 · 10⁻⁵ mg/dm³. **Keywords:** molecularly imprinted polymer, 3-(4-hydroxyphenyl)lactic acid, HPLA, sepsis, polyimide, amperometric sensor.

For citation: Korovkina A.O., Wu Hoang Yen, Beloborodova N.V., Vybornyi A.Yu., Zyablov A.N. Determination of 3-(4-hydroxyphenyl)lactic acid by an amperometric sensor with molecularly imprinted polymers. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2024. 24(2): 227-235. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12127>

Введение

Одной из самых актуальных проблем современной медицины является сепсис, от которого, по статистике, ежегодно умирают 11 миллионов человек. Кроме того, миллионы больных, перенесших его, становятся инвалидами. Сепсис представляет собой опасную для жизни органную дисфункцию, вызванную нарушением регуляции реакции организма на инфекцию. Если сепсис не распознать и не лечить на ранней стадии, органная дисфункция прогрессирует вплоть до полиорганной недостаточности, часто развивается септический шок с высокой вероятностью летального исхода [1-7].

Традиционно диагностика сепсиса определялась сочетанием клинических критериев и результатов микробиологических исследований [8-11]. Большинство существующих показателей воспалительного процесса, таких как температура тела, частота пульса и дыхания, являются неспецифическими показателями, ненадежны и часто могут приводить к ошибочной диагностике [12]. С начала 2000-х годов ведется интенсивный поиск биомаркеров для диагностики сепсиса, крайне актуальным является разработка чувствительных, экспрессных методов [8, 13]. Среди наиболее широко

используемых маркеров сегодня можно выделить прокальцитонин, С-реактивный белок и др. Концентрация таких соединений в крови повышается у больных с тяжелым сепсисом и септическим шоком, коррелирует со степенью поражения органов, но снижается по мере выздоровления, поэтому эти белки могут служить в качестве биомаркеров для диагностики и мониторинга сепсиса [10-12].

Биомаркерами могут выступать не только определенные белки и протеины, но и низкомолекулярные соединения. Показано, что среди низкомолекулярных метаболитов особый интерес представляют фенилсодержащие карбоновые кислоты (ФКК) и, в частности, 3-(4-гидроксифенил)молочная кислота (4-ГФМК) [14, 15]. Высокий уровень ФКК в сыворотке крови коррелирует с тяжестью клинических проявлений органных дисфункций и риском летального исхода. Выявлено многократное увеличение при сепсисе сывороточных концентраций фенольных метаболитов, и особенно 3-(4-гидроксифенил)молочной кислоты, по сравнению с фоновыми концентрациями [15, 16]. Известно, что в организме человека 4-ГФМК является продуктом эндогенного метаболизма ароматических аминокислот (фенилаланина, тирозина), с

другой стороны, 4-ГФМК является промежуточным продуктом бактериальной биодegradации тех же аминокислот, поэтому его можно назвать общим метаболитом для человека и бактерий. Накопление 4-ГФМК в крови при сепсисе можно расценить как отражение грубых метаболических нарушений во взаимодействии макро- и микроорганизмов. Уровень 4-ГФМК представляет большой медицинский интерес как показатель тяжести септического состояния, что определяет актуальность разработки экспресс-способов определения концентрации этого метаболита в крови пациентов [15]. Другим примером растущей востребованности биомаркера 4-ГФМК является клиническое исследование новых возможностей ранней диагностики бактериального менингита при осложненном течении послеоперационного периода у нейрохирургических пациентов. В этом случае исследовалась спинномозговая жидкость (ликвор) и было показано, что данные о концентрации 4-ГФМК по информативности могут опережать другие традиционные лабораторные тесты и биомаркеры [17].

В настоящее время для определения 4-ГФМК в крови используют метод газовой хромато-масс-спектрометрии (ГХ-МС). Этот метод требует ступенчатой пробоподготовки, наличия в лаборатории дорогостоящего оборудования для ГХ-МС анализа, соответствующих специалистов, что ограничивает его применение [16, 18, 19]. Методами ГХ-МС и ВЭЖХ установлено, что концентрация 3-(4-гидроксифенил)молочной кислоты в крови здоровых людей находится строго в пределах 1-2.5 мкМ, валидированные референтные значения сывороточных концентраций 4-ГФМК 1.2-1.7 мкМ, в то время как у пациентов с сепсисом уровень 4-ГФМК

многократно превышает эти значения, до 5-10 мкМ и выше, в отдельных случаях достигая 100 мкМ [20, 21].

Современные экспресс-методы на основе сенсорных систем способны существенно уменьшить временные затраты при определении аналита [22-26]. Преимущества этих методов заключаются также в отсутствии необходимости систематического отбора проб на анализ благодаря использованию датчиков для определения концентрации веществ непрерывно и непосредственно в точке отбора проб. Также известно, что для повышения селективности сенсорных систем их поверхность можно модифицировать различными материалами, в частности, полимерами с молекулярными отпечатками [26-30]. Цель работы: разработка экспрессного способа определения 3-(4-гидроксифенил)молочной кислоты в модельных водных растворах модифицированными амперометрическими сенсорами.

Экспериментальная часть

В работе использована 4-ГФМК в качестве перспективного биомаркера сепсиса. Полное химическое название искомого маркера сепсиса – 3-(4-гидроксифенил)молочная кислота или 2-гидрокси-3-(4-гидроксифенил)пропановая кислота. Она представляет собой 2-гидроксикарбоновую кислоту, в которой один из метильных атомов водорода замещен 4-гидроксифенильной группой, с молярной массой 182.17 (рис. 1).

Для исходных растворов аналита использовали стандарт 3-(4-гидроксифенил)молочной кислоты (Sigma-Aldrich), по навеске, взятой на аналитических весах, а затем методом последовательного

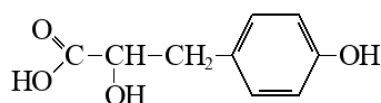


Рис. 1. Структурная формула 3-(4-гидроксифенил)молочной кислоты.
Fig. 1. Structural formula of 3-(4-hydroxyphenyl)lactic acid

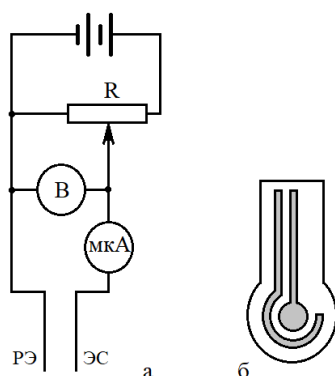


Рис. 2. Схема амперометрической установки (а) и планарный сенсор РЭ – рабочий электрод, ЭС – электрод сравнения

Fig. 2. Layout of the amperometric unit (a) and planar sensor, WE: working electrode, RE: reference electrode

разбавления серии растворов в диапазоне концентраций 0.2-0.0002 г/дм³.

Для определения 3-(4-гидроксифенил)молочной кислоты в модельных растворах использовали двух электродную амперометрическую установку (рис. 2). Источником питания служил прибор QJ1803С с интегрированными в него вольтметром, амперметром и потенциометром для регулировки напряжения в цепи.

Для изготовления планарных сенсоров, в качестве подложки выбрана полиимидная пленка, покрытая медной фольгой. Выбор данной пленки обусловлен химической стойкостью, устойчивостью к разрыву, а также широким рабочим диапазоном температур. После очистки и обезжиривания медного слоя, на него с помощью термотрансфера перенесли трафарет сенсора и провели химическое травление полученной заготовки. После чего сенсоры промыли дистиллированной водой и осушили фильтровальной бумагой. Полученные планарные сенсоры имели размеры сенсоров 5x7 мм.

Модифицирование электродов планарных сенсоров проводили полимером с молекулярными отпечатками 4-ГФМК. Для этого готовили полимеризационную смесь на основе сополимера 1,2,4,5-бензолтетракарбоновой кислоты с 4,4'-диаминодифенилоксидом в N,N-диметил-

формамиде (ОАО МИПП НПО «Пластик», Москва) и стандарта 3-(4-гидроксифенил)молочной кислоты (4-hydroxyphenyllactic acid), Sigma-Aldrich). Синтез проводили по стандартной методике, описанной ранее [31, 32], в две стадии (I – стадия при температуре 80°C, II – стадия при 180°C) методом нековалентного импринтинга [33-38].

Обсуждение результатов

Разработка экспресс-способов определения 4-ГФМК в крови пациентов состоит из нескольких этапов. На первом этапе представлялось целесообразным создать сенсоры на основе полимеров с молекулярными отпечатками и отработать методику определения 4-ГФМК в модельных водных растворах.

Для решения этой задачи планарные сенсоры модифицировали полимером с отпечатками 4-гидроксифенилмолочной кислоты (ПМО 4-ГФМК) и неимпринтированным полимером (полимером сравнения, ПС). Определение 3-(4-гидроксифенил)молочной кислоты в модельных растворах проводили методом градуировочного графика. Для ПМО-сенсора наблюдается линейная и убывающая зависимость силы тока от концентрации 4-ГФМК (рис. 3).

Установленные метрологические характеристики амперометрического сенсора на основе полимера с молекулярным

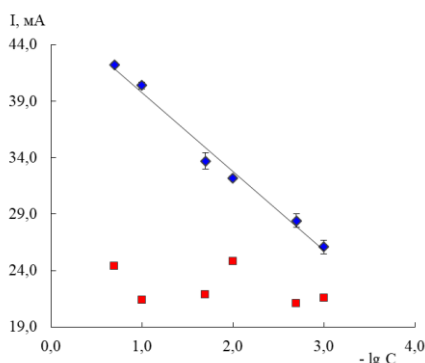


Рис. 3. Зависимость силы тока от $-\lg C$ 4-ГФМК в водном растворе: 1 – для сенсора на основе ПМО-4-ГФМК; 2 – для сенсора на основе ПС

Fig. 3. Dependence of current strength on $-\lg C$ HPLA in an aqueous solution, 1 – for the sensor based on HPLA MIP, 2 – for the sensor based on reference polymer

Таблица 1. Метрологические характеристики сенсора на основе на основе ПМО-4-ГФМК)
 Table 1. Metrological characteristics of the sensor based on HPLA MIP

Сенсор	Аналит	Диапазон определяемых концентраций, г/дм ³	C_{\min} , г/дм ³	S_r , %
ПМО-4-ГФМК	3-(4-гидроксифенил) молочной кислоты	$0.2-1 \cdot 10^{-3}$	$4.5 \cdot 10^{-4}$	1.9

Таблица 2. Определение 4-ГФМК в модельных растворах с помощью амперометрического сенсора методом «введено – найдено», (n=5; P=0.95)

Table 2. Detection of HPLA in model solutions by an amperometric sensor using the “introduced-found” method, (n=5; P=0.95)

Сенсор	Аналит	Введено С, г/дм ³	Найдено С, г/дм ³	S_r , %
ПМО-4-ГФМК	3-(4-гидроксифенил) молочная кислота	0.20	0.22 ± 0.04	3.0
		0.10	0.12 ± 0.04	5.7
		0.02	0.021 ± 0.009	7.5

Таблица 3. Определение 4-ГФМК в модельных растворах с помощью амперометрического сенсора методом добавок

Table 3. Detection of HPLA in model solutions using the amperometric sensor by the spike test

Сенсор	Аналит	Введено С, г/дм ³	Найдено С, г/дм ³	S_r , %
ПМО-4-ГФМК	3-(4-гидроксифенил) молочная кислота	0.2	0.196 ± 0.018	3.0
	молочная кислота	0.2	0.00004 ± 0.00003	13.8

отпечатком 3-(4-гидроксифенил)молочной кислоты представлены в таблице 1. Экспериментально установлен предел обнаружения 3-(4-гидроксифенил)молочной кислоты составил $4.5 \cdot 10^{-4}$ г/дм³. Правильность определения 4-ГФМК в

модельных растворах с помощью модифицированного амперометрического сенсора проверено методом «введено – найдено» (табл. 2).

Также было проведено определение 3-(4-гидроксифенил)молочной кислоты в

модельных растворах. Модельный раствор содержал анализируемую 3-(4-гидроксифенил)молочную кислоту ($C=0.2$ мг/дм³) и молочную кислоту ($C=0.2$ мг/дм³). Результаты определения представлены в таблице 3.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности ПМО-сенсора определять анализируемое вещество. Относительное стандартное отклонение проведенного сравнения концентраций кислоты приготовленных модельных растворов и установленных с помощью сенсора на основе ПМО-4-ГФМК не превышает 10%.

Заключение

Методом нековалентного импринтинга получили амперометрические сенсоры с молекулярными отпечатками 3-(4-

гидроксифенил)молочной кислоты. Определены метрологические характеристики полученных сенсоров. Определен диапазон определяемых концентраций, который составил 0.2-0.001 г/дм³.

Амперометрические сенсоры на основе полимеров с молекулярными отпечатками позволяют распознавать молекулы 3-(4-гидроксифенил)молочной кислоты в жидких средах. В перспективе данные сенсоры могут использоваться для анализа биологических систем и определения в них 4-ГФМК.

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.

Список литературы/References

1. Bone R.C., Charles J., Fisher J.R., Clemmer, T.P., Slotman, G.J., Metz, C.A., Balk, R.A. Sepsis Syndrome: A Valid Clinical Entity. *Critical Care Medicine*. 1989; 17(5): 389-393.

2. Bone R.C., Balk R.A., Cerra F.B., Dellinger R.P., Fein A.M., Knaus W.A., Schein R.M.H., Sibbald W.J., and Members of the ACCP/SCCM Consensus Conference. Definitions for Sepsis and Organ Failure and Guidelines for the Use of Innovative Therapies in Sepsis. *Chest*. 1992; 101: 1644-1655.

3. Kempker JA, Martin GS. The Changing Epidemiology and Definitions of Sepsis. *Clin Chest Med*. 2016; 37(2): 165-79.

<https://doi.org/10.1016/j.ccm.2016.01.002>

4. Abraham E. New Definitions for Sepsis and Septic Shock: Continuing Evolution but with Much Still to Be Done. *JAMA*. 2016; 315(8): 757-759.

5. Calvert J.S., Price D.A., Chettipally U.K., Barton C.W., Feldman M.D., Hoffman J.L., Jay M., Das R. A computational approach to early sepsis detection. *Computers in biology and medicine*. 2016; 74: 69-73.

6. Singer M. Deutschman C.S., Seymour C.W. The Third International Consensus Definitions for Sepsis and Septic Shock (Sepsis-3). *JAMA*. 2016; 315(8): 801-810.

7. Ahmedov R.F., Karabaev H.K., Tagaev K.R. Nash opyt lecheniya ozhogovogo sepsisa. *Zhurnal Neotlozhnaya hirurgiya im. I.I. Dzhanelidze*. 2021; 1:10-11. (In Russ.)

8. Whicher J., Bienvenu J., Monneret G. Procalcitonin as an acute phase marker. *Ann Clin Biochem*. 2001; 8(5): 483-93. <https://doi.org/10.1177/000456320103800505>

9. Romasheva M.L., Proshin D.G. Diagnostika sepsisa u bol'nyh v kriticheskikh sostoyaniyah. *Obshchaya reanimatologiya*. 2007; 4: 34-36. (In Russ.)

10. Kataeva A.V., Bahtina ZH.A. Sokrashchenie priznakovogo prostranstva v diagnostiki sepsisa. *ITNOU: Informatcionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii i upravlenii*. 2018; 5(9): 30-33. (In Russ.)

11. Kozlov V.K. Sepsis, tyazhelyj sepsis, septicheskiy shok: patogeneticheskoe obosnovanie diagnoza, klinicheskaya interpretaciya, principy i metody diagnostiki. *Kliniko-laboratornyj konsilium*. 2014; 2(49): 20-40. (In Russ.)



12. Rudnov V.A., Kulabuhov V.V. SEPSIS-3: obnovlennye klyuchevye polozheniya, potencial'nye problemy i dal'nejshie prakticheskie shagi. *Vestnik anesteziologii i reanimatologii*. 2016; 13(4): 4-11. <https://doi.org/10.21292/2078-5658-2016-13-4-4-11>
13. Zhou Y., Yang Y., Pappas D. Microfluidic Chips for Sepsis Diagnosis. *Methods in Molecular Biology*. 2021; 2321: 207-219. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1488-4_18
14. Beloborodova N.V., Osipov A.A., Bedova A.YU. Biologicheskie svoystva nekotorykh nizkomolekulyarnykh aromatischeskikh mikrobnnykh metabolitov, associirovannykh s sepsisom. *Antibiotiki i himioterapiya*. 2013; 7-8: 48-61. (In Russ.)
15. Moroz V.V., Beloborodova N.V., Osipov A.A., Vlasenko A.V., Bedova A.YU., Pautova A.K. Fenilkarbonovye kisloty v ocenke tyazhesti sostoyaniya i effektivnosti lecheniya bol'nykh v reanimatologii. *Obshchaya reanimatologiya*. 2016; 4: 37-48. (In Russ.)
16. Moroz V.V., Beloborodova N.V., Bedova A.Yu., Revel'skii A.I., Getsina M.L., Osipov A.A., Sarshor Yu.N., Buchinskaya A.A., Olenin A.Yu. Development of methods of the gas chromatographic determination of phenylcarboxylic acids in blood serum and their adaptation to clinical laboratory conditions. *Anal Chem*. 2015; 70: 495-501. <https://doi.org/10.1134/S1061934815040103>
17. Pautova A.K., Meglei A.Y., Chernevskaya E.A., Alexandrova I.A., Beloborodova N.V. 4-Hydroxyphenyllactic Acid in Cerebrospinal Fluid as a Possible Marker of Post-Neurosurgical Meningitis: Retrospective Study. *J. Pers. Med*. 2022; 12: 399. <https://doi.org/10.3390/jpm12030399>
18. Pautova A.K., Sobolev P.D. Patent RF, № 263571, 2017. (In Russ.)
19. Hughes A.T., Milan A.M., Shweihdi E., Gallagher J., Ranganath L. Method development and validation for analysis of phenylalanine, 4-hydroxyphenyllactic acid and 4-hydroxyphenylpyruvic acid in serum and urine. *JIMD Reports*. 2022; 63(4): 341-350. <https://doi.org/10.1002/jmd2.12287>
20. Sobolev P.D., Burnakova N.A., Beloborodova N.V., Revelsky A.I., Pautova A.K. Analysis of 4-Hydroxyphenyllactic Acid and Other Diagnostically Important Metabolites of α -Amino Acids in Human Blood Serum Using a Validated and Sensitive Ultra-High-Pressure Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry Method. *Metabolites*. 2023; 13: 1128. <https://doi.org/10.3390/metabo13111128>
21. Beloborodova N.V. Serum Aromatic Microbial Metabolites as Biological Markers in Intensive Care. In: Rajendram, R., Preedy, V.R., Patel, V.B. (eds) Biomarkers in Trauma, Injury and Critical Care. Biomarkers in Disease: Methods, Discoveries and Applications. Springer, Cham. 2023; 13: 245-268.
22. Mohamed A.H., Ahmed H., Mokhtar M., Sherin H., Mahmoud E., Dual fluorescence-colorimetric sensor based on silver nanoparticles for determination of tobramycin in its pharmaceutical preparations. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2023; 303: 123172.
23. Wenhao M., Wanyi X., Shaoxi F., Shixuan H., Bohua Y., Yongjia W., Changjun H., Danqun H., Deqiang W., Nanopore electrochemical sensors for emerging hazardous pollutants detection. *Electrochimica Acta*, 2024; 475: 143678.
24. Lin' K.N., Duvanova O.V., Nikitina S.Yu., Zyablov A.N. Primenenie p'ezosensirov dlya opredeleniya karbonovykh kislot v promezhutochnykh produktah proizvodstva pishchevogo etanola. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2019; 85(4): 11-16.
25. Duvanova O.V., Krivonosova I.A., Zyablov A.N., Falaleev A.V., Selemenev V.F., Sokolova S.A. Primenenie p'ezoelektricheskikh sensorov dlya opredeleniya oleinovej i pal'mitinovej kislot v rastitel'nykh maslah. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2017; 83(2): 18-22. (In Russ.)

26. Aytaç G., Gamze K., Mahmut K., Savaş S., Rıdvan S., Preparation of MIP-based QCM nanosensor for detection of caffeic acid. *Talanta*, 2014; 119: 533-537.
27. Zhibrova Yu.A., Zyablov A.N., Shcheglova N.A., Krasnikova O.P., Selemenev V.F. Polimery s molekulyarnymi otpechatkami dlya p'ezokvarcevykh sensorov. Soobshchenie 1. Analiz lekarstvennykh preparatov, sodержashchih glicin. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2008; 8(4): 686-688. (In Russ.)
28. Zyablov A.N., Govoruhin S.I., Duvanova O.V., Selemenev V.F., Nguen A.T. Protochno-inzhekcionnoe opredelenie valina p'ezokvarcevyim sensorom, modifitsirovannym polimerom s molekulyarnymi otpechatkami. *Analitika i kontrol'*. 2014; 18(4): 438-441. (In Russ.)
29. Krivonosova I.A., Duvanova O.V., Zyablov A.N., Sokolova S.A., Dyakonova O.V. The determination of fatty acids in liquids using piezoelectric sensors based on molecular imprinting polymers. *Butlerov communications*. 2015; 42(6): 152-157.
30. Arian Y., Somayeh F., Nishat T., Mina H., Molecularly imprinted polymers (MIP) combined with Raman spectroscopy for selective detection of Δ^9 -tetrahydrocannabinol (THC). *Talanta*. 2024; 267: 125271.
31. Zyablov A. N., Duvanova O. V. i dr. Patent RF, № 137946, 2014. (In Russ.)
32. Zyablov A. N., Duvanova O. V. i dr. Patent RF, № 1138636, 2014. (In Russ.)
33. Merenkova A.A., Vu H.I., Grechkina M.V., Zyablov A.N. Morfologiya poverhnosti polimerov s molekulyarnymi otpechatkami na osnove poliimida. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2020; 20(6): 760-764. (In Russ.)
34. D'yakonova O.V., Zyablov A.N., Kotov V.V., Eliseeva T.V., Selemenev V.F., Frolova V.V. Issledovanie sostoyaniya poverhnosti membran na osnove poliimidokisloty. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2005; 5(4): 501-506. (In Russ.)
35. D'yakonova O.V., Sokolova S.A., Zyablov A.N., Zhibrova YU.A. Issledovanie sostoyaniya poverhnosti membrannykh materialov metodom skaniruyushchej zondovoj mikroskopii. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2008; 8(5): 863-868. (In Russ.)
36. Vu H.I., Kao N.L., Zyablov A.N. Analiz svojstv plenok molekulyarno-imprintirovannykh polimerov na osnove poliimida. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2021; 21(3): 360-368. (In Russ.)
37. Yahan Cui, Jie Ding, Yu Su, Lan Ding. Facile construction of magnetic hydrophilic molecularly imprinted polymers with enhanced selectivity based on dynamic non-covalent bonds for detecting tetracycline. *Chemical Engineering Journal*. 2023; 52(1): 139291.
38. Ruixia G., Yi H., Lili Z., Xihui C., Dechun L., Min Z., Yuhai T., Yuansuo Z. A facile method for protein imprinting on directly carboxyl-functionalized magnetic nanoparticles using non-covalent template immobilization strategy. *Chemical Engineering Journal*. 2016; 284: 139-148.

Информация об авторах / Information about the authors

А.О. Коровкина – студент кафедры аналитической химии, Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

Ву Хоанг Иен – аспирант кафедры аналитической химии, Воронежский государственный университет, Воронеж; преподаватель кафедры Менеджмента качества и безопасности пищевых продуктов, Пищевой Промышленный Университет Хошимина, Вьетнам

Н.В. Белобородова – д.м.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ, глав.науч.сотр,

A.O. Korovkina – student, department of analytical chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russia, korovkina.ao@gmail.com

Vu Hoang Yen – postgraduate student, department of analytical chemistry, Voronezh State University, Voronezh; lecturer Department of Food Safety and Quality Management, Ho Chi Minh City University of Food Industry. e-mail: yenvh@hufi.edu.vn

N.V. Beloborodova – PhD, professor, honored worker of science of the RF, chief researcher, head of the lab in Federal Research and Clinical Center of



зав.лаб. ФНКЦ реаниматологии и реабилитологии, Москва, Россия

А.Ю. Выборный – студент кафедры аналитической химии, Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

А.Н. Зяблов – д.х.н., профессор кафедры аналитической химии, Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

Intensive Care and Rehabilitation, Moscow, Russia, nvbeloborodova@yandex.ru

A.Yu. Vybornyi – student, department of analytical chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russia, antonvyb.job@gmail.com

A.N. Zyablov – Dr.Sci. (Chemistry), professor, department of analytical chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russia, alex-n-z@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 26.05.2023; поступила после исправлений 10.01.2024; одобрена после рецензирования 10.04.2024; принята к публикации 17.04.2024.
The article was submitted 26.05.2023; approved after reviewing 10.04.2024; accepted for publication 17.04.2024.