



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 543.544:663.51

doi: 10.17308/sorpchrom.2023.23/11572

Хроматографические методы определения свободного бисфенола А в технической и пищевой продукции

**Ярослав Олегович Рудаков^{1,2}✉, Владимир Федорович Селеменев²,
Алексей Митрофанович Хорохордин¹, Александр Анатольевич Волков²**

¹Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия, robi57@mail.ru✉

²Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

Аннотация. В статье представлен краткий обзор хроматографических способов определения свободного бисфенола А в технической и пищевой продукции. Бисфенол А (БФА) используется в качестве мономера при получении некоторых пластиков и эпоксидных смол. Свободный БФА может содержаться в количествах, превышающих допустимый уровень в пищевой пластиковой таре и в пищевой продукции, упакованной в этой таре. Предельно допустимая концентрации (ПДК) БФА в воздухе рабочей зоны – 5 мг/м³, что в пересчете на жидкость дает 5 мкг/дм³. ПДК для содержания БФА в воде, в водных объектах хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования – 0.1 мг/дм³. В европейских странах для пластмасс, контактирующих с пищевыми продуктами, значение миграции БФА равно 0.6 мг/кг. Несмотря на сравнительно низкую токсичность БФА, он способен накапливаться в организме человека и вызывать вредное воздействие. Для определения БФА в пластике, пищевых продуктах, биологических жидкостях чаще всего применяют газовую хроматографию с предварительной дериватизацией силилированием или ацилированием аналита. Разработаны также газохроматографические методики прямого хроматографирования на термостойких колонках. В качестве детектирующих устройств применяют, наряду с пламенно-ионизационным детектором, флуорометрический детектор и масс-спектрометрический детектор. Альтернативным методом определения БФА является ВЭЖХ с оптическими и масс-спектрометрическими способами детектирования. При определении БФА получил развитие также метод ТСХ. В пробоподготовке БФА применяют методы твердофазной экстракции (ТФЭ), жидкостно-жидкостной экстракции (ЖЖЭ), дисперсионной жидкостно-жидкостной микроэкстракции (ДЖЖМЭ), комбинированный метод экстракции с разделением в ацетонитриле (QuEChERS). **Ключевые слова:** бисфенол А, хроматографические методы, эпоксидная смола, пищевая пластиковая тара, контроль качества и безопасности.

Благодарности: исследование проведено в Воронежском государственном техническом университете, при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, Соглашение № 075-15- 2021-662.

Для цитирования: Рудаков Я.О., Селеменев В.Ф., Хорохордин А.М., Волков А.А. Хроматографические методы определения свободного бисфенола А в технической и пищевой продукции // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2023. Т. 23, № 4. С. 642-656. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11572>

Original article

Chromatographic methods for the determination of free bisphenol A in technical and food products

**Yaroslav O. Rudakov^{1,2}✉, Vladimir F. Selemenev²,
Alexey M. Khorokhordin¹, Alexander A. Volkov²**

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia, robi57@mail.ru✉

²Voronezh State University, Voronezh, Russia

Abstract. The article provides a brief overview of chromatographic methods for the determination of free bisphenol A in technical and food products. Bisphenol A (BPA) is used as a monomer in the production of



some plastics and epoxy resins. Free BPA may be present in quantities exceeding acceptable levels in plastic food containers and in food products packaged in these containers. Maximum permissible concentration (MPC) of BPA in the air of the working area is 5 mg/m^3 , which in terms of liquid is $5 \text{ }\mu\text{g/dm}^3$. Maximum permissible concentration for the content of BPA in water, in water bodies for domestic, drinking and community water use is 0.1 mg/dm^3 . In European countries for plastics in contact with food, the BPA migration value is 0.6 mg/kg . Despite the relatively low toxicity of BPA, it can accumulate in the human body and cause harmful effects. To determine BPA in plastic, food products, and biological fluids, gas chromatography with preliminary derivatization by silylation or acylation of the analyte is most often used. Gas chromatographic techniques for direct chromatography on heat-resistant columns have also been developed. A fluorometric detector and a mass spectrometric detector are used as detection devices, along with a flame ionization detector. An alternative method for determination of BPA is HPLC with optical and mass spectrometric detection methods. The TLC method was also developed for the determination of BPA. For the preparation of BPA samples, solid-phase extraction (SPE), liquid-liquid extraction (LLE), dispersive liquid-liquid microextraction (DLLME), combined extraction method with acetonitrile separation (QuEChERS) are used.

Keywords: bisphenol A, chromatographic methods, epoxy resin, food plastic containers, quality and safety control.

Acknowledgements: the study was conducted at Voronezh State Technical University and supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Agreement No. 075-15-2021-662.

For citation: Rudakov Ya.O., Selemenev V.F., Khorokhordin A.M., Volkov A.A. Chromatographic methods for the determination of free bisphenol A in technical and food products. *Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy*. 2023. 23(4): 642-656. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11572>

Введение

Бисфенол А [2,2-бис (4-гидроксифенил)пропан; ВРА, БФА] – ключевой компонент эпоксидных смол, широко используемых в качестве внутренних покрытий металлических банок для пищевых продуктов и напитков, в качестве компонентов многих потребительских товаров, включая игрушки, водопроводные трубы, контейнеры для питья, линзы для очков, спортивное защитное снаряжение, стоматологические композиты, медицинское оборудование и трубки, а также бытовую электронику. Это соединение привлекает повышенное внимание как научного сообщества, так и регулирующих органов. Официально признано его разрушающее действие на эндокринную систему. Прямой контакт между пищевыми продуктами и упаковочными материалами создает условия для миграции БФА в содержимое упаковки и пероральное попадание этого контаминанта в организм человека.

Многочисленные лабораторные исследования на животных, а также некоторые наблюдения на людях продемонстрировали, что БФА связан с повышенной частотой сердечно-сосудистых заболева-

ний, диабета, рака репродуктивной системы (яичек, предстательной железы и т.д.), проблем с фертильностью (уменьшение количества сперматозоидов), нарушениями работы печеночных и других ферментов, продуцируемых эндокринной системой [1-4]. Имеются также доказательства того, что даже незначительное воздействие БФА на чувствительных стадиях жизненного цикла (плод, младенцы и дети младшего возраста), может привести к необратимому изменению гормонального статуса.

Так, ученые Гарвардского университета предупреждают, что употребление консервов из металлических банок приводит к предельно опасному для здоровья увеличению концентрации БФА в организме. Для участия в исследовании было приглашено 75 добровольцев – мужчин и женщин разного возраста. Участники эксперимента были поделены на 2 группы: первая в течение 5 дней ежедневно питалась консервированным супом из металлических банок, вторая употребляла в пищу аналогичный, но свежеприготовленный суп. Затем рацион питания групп менялся: первая группа получила свежий суп, а вторая – консервированный. Ежедневно на протяжении каж-

дого этапа эксперимента у участников исследовалась моча, в которой измерялась концентрация БФА. Оказалось, что уже после употребления одной банки консервированного супа весом 340 г, уровень БФА в моче добровольцев повышался на 1200%! Ученые отмечают, что ожидали увеличения концентрации бисфенола А в организме участников эксперимента, но не были готовы к таким масштабным цифрам.

И все же, БФА и другие фенольные соединения, разрушающие эндокринную систему, широко используются в промышленности. Как уже сказано выше, бисфенол А играет важную роль в производстве эпоксидных смол и поликарбонатных пластиков, а также используется в качестве стабилизатора или антиоксиданта во многих типах пластмасс, таких как поливинилхлорид, используемый для водопроводных труб. Более того, бисфенол А постоянно попадает в водную среду с промышленными, сельскохозяйственными и муниципальными сточными водами. БФА в различных регионах обнаружен в донных отложениях, сточных водах, почве, пробах вод [6,7].

Как показали отдельные исследования [1, 4], маркировка пластиковых изделий «BPA-free» или «0% BPA» нередко не гарантирует отсутствия БФА. На основании данных этих исследований в [1,4] даны рекомендации не использовать тару, возможно содержащую БФА для хранения спирто- и жиросодержащей продукции; не нагревать в этой таре воду и пищу. БФА, как известно, хорошо растворим в этаноле и жиросодержащих фазах.

Таким образом, БФА представляет серьезную озабоченность в плане охраны окружающей среды из-за высокого потенциала воздействия на человека и установленной токсичности. Люди подвергаются воздействию бисфенола А в пище, которую они едят, в воде, которую они пьют, и в некоторых рабочих зонах. Потенциально возможно воздействие БФА на рабочем месте, особенно во время его

производства и производства материалов с применением БФА как мономера, стабилизаторов и пр.

А различные токсичные формы хлорированного бисфенола А (моно-, ди-, три- и тетрахлорпроизводных БФА), обнаруженные в сточных водах заводов по переработке макулатуры, в воде, обработанной хлором, усугубляют проблему миграции БФА в окружающую среду. С другой стороны, хлорированные производные БФА находят лишь ограниченное применение в промышленности. Поэтому единственным источником воздействия хлорированных производных, скорее всего, будет вода, обработанная хлором. Вместе с тем, эстрогенная активность хлорированных производных может быть выше, чем у исходных соединений [5, 7].

Были разработаны различные аналитические методы для мониторинга и количественного определения БФА. Целью обзора стало обсуждение возможностей хроматографических методов анализа в обнаружении БФА в различных средах и объектах.

Газовая хроматография

БФА сравнительно высококипящее соединение – температура кипения 220°C, поэтому для газохроматографического анализа чаще всего применяют дериватизацию БФА силилирующими и ацилирующими реагентами [8-11]. В качестве детектора пригоден стандартный пламенно-ионизационный детектор и масс-спектрометр. В связи с широким производством хромато-масс-спектрометров, обусловленным их высокой эффективностью в химическом анализе, усовершенствованием их конструкции, эти приборы стали доступнее по цене, стало больше разработок методик с применением ГХ-МС, в том числе методик определения БФА в разных средах.

Определение соединений бисфенольного типа в пищевых продуктах требует этапа подготовки образцов перед хроматографическим анализом. Твердофазная



экстракция (ТФЭ) и жидкостно-жидкостная экстракция (ЖЖЭ) [5-11] это наиболее широко используемые методы выделения БФА из пищевых продуктов. Однако эти традиционные подходы утомительны и отнимают много времени и требуют больших объемов пробы и органических растворителей, поскольку для обеспечения полного выделения бисфенола А обычно необходимы повторные экстракции. Использование большого количества органических растворителей приводит к образованию загрязнения окружающей среды, риски для здоровья человека и дополнительные затраты на обработку остатков. Из-за важности разработки чистых химических процедур с минимальным использованием органических растворителей появился ряд миниатюрных методов сорбционной экстракции для подготовки образцов. Одним из наиболее важных методов предварительной концентрации без растворителей является твердофазная микроэкстракция, которая обеспечивает возможность автоматизации и является чистым, селективным, быстрым и эффективным методом, улучшающим выделение и очистку загрязняющих веществ из пищевых продуктов [12].

Для одновременного определения БФА и бисфенола В (БФБ) в образцах консервированных морепродуктов был разработан новый простой и надежный метод, сочетающий процедуру экстракции с разделением в ацетонитриле с последующей дисперсионной твердофазной очисткой (QuEChERS), с дисперсионной жидкостно-жидкостной микроэкстракцией (ДЖЖМЭ) и дальнейшим газохроматографическим масс-спектрометрическим анализом [9]. Помимо обеспеченного большого коэффициента концентрации на стадии ДЖЖМЭ, эта стадия была разработана таким образом, чтобы осуществить одновременное ацетилирование соединений, необходимых для их газохроматографического анализа.

В качестве экстрагирующего растворителя использовали тетрахлорэтилен, в то время как ацетонитрильный экстракт, полученный методом QuEChERS, использовали в качестве диспергирующего растворителя, а уксусный ангидрид - в качестве производного реагента. Были оценены основные факторы, влияющие на эффективность QuEChERS и ДЖЖМЭ, включая природу дисперсионных сорбентов QuEChERS, количество экстрактивных и дисперсионных растворителей ДЖЖМЭ, а также природу и количество производного реагента. Процедура ДЖЖМЭ обеспечивает эффективное обогащение экстракта, обеспечивая требуемую чувствительность даже при использовании одного квадрупольного масс-спектрометра в качестве детектора. Оптимизированный метод ГХ-МС показал достаточную точность (извлечение >68%), воспроизводимость (относительное стандартное отклонение <21%) и чувствительность к целевым анализируемым веществам (пределы обнаружения метода составляют 0.2 мкг/кг для БФА и 0.4 мкг/кг для БФБ. Проверка 47 образцов консервированных морепродуктов, поступивших в продажу в Португалии, выявила присутствие бисфенола А более чем в 83% образцов с содержанием от 1.0 до 99.9 мкг/кг, в то время как БФБ был найден только в 1 образце на уровне 21.8 мкг/кг.

Производные БФА с использованием смеси реагентов для силилирования (BSTFA с 1 % TMCS) дают абсолютную интенсивность сигнала, полученного в стандартном растворе и реальных образцах немного выше, чем в случае ацетильных производных, и меньшее количество мешающих соединений [13].

Благодаря своей простоте, высокому уровню чувствительности и точности разработанный ГХ-МС способ может быть широко применен для многих других матриц, таких как консервированные овощи, фрукты и мясо.

Для экстракции БФА применяли ацетонитрил или его смесь, например, с этилацетатом или изопропиловым спиртом. В [13] вместо жидкостно-жидкостной экстракции (ЖЖЭ) токсичным и дорогостоящим ацетонитрилом и последующей дериватизации БФА уксусным ангидридом - веществом, входящим в перечень прекурсоров, подлежащих контролю на территории Российской Федерации, предложена экстракция из пластика этанолом, в котором БФА хорошо растворяется и прямое хроматографирование БФА. Такой подход можно отнести к «зеленой» хроматографии.

БФА с рядом других активных эндокринных разрушителей (нонилфенол, октилфенол) были проанализированы в [13] двух водоносных горизонтах и соответствующих поверхностных водах, чтобы определить потенциал выщелачивания этих соединений в грунтовых водах и в конечном итоге соотнести эти уровни с пробами поверхностных вод. Образцы экстрагировали с помощью ТФЭ с полимерными картриджами OASIS и анализировали методом ГХ-МС.

На основании анализа литературных и патентных источников [14-15 и цитируемые в этих публикациях ссылки] для определения БФА в пластмассах часто используют рабочую станцию Agilent 8890 (США) с масс-селективным детектором Agilent GC/MSD 5977B и системой автоматического ввода пробы Agilent G4513A. Одним из преимуществ этой газохроматографической системы является возможность подключения для ввода образцов многофункционального пиролизера Multi-Shot pyrolyzer EGA/PY-3030D (Япония). Пиролизер является универсальным вспомогательным устройством для изучения химического состава добавок в полимер, а также идентификации самого полимера с минимально простой подготовкой образца - небольшой «кусочек» полимера помещается в стальной тигель с кварцевым покрытием. Таким образом, пиролитическая газовая хромато-

масс-спектрометрия – уникальное направление развития метода ГХ-МС, позволяющее при программировании температуры устройства ввода пробы, вначале разделить и зарегистрировать летучие присадки и примеси в полимере, затем получить хроматограмму и масс-спектры продуктов пиролиза полимера, решая одновременно несколько задач, в частности, идентификацию присадок и примесей, а также идентификацию полимера [15]. Для прямого определения методом ГХ-МС пригодны неподвижные фазы, приведенные в табл. [14].

Для определения БФА в [14] выбрали неполярную хроматографическую колонку Ultra ALLOY®-5 (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm) из нержавеющей стали, весомым преимуществом которой является возможность работы в широком температурном диапазоне с максимальной рабочей температурой 360/380°C. Кроме того, за счет металлических наконечников на концах, предназначенных для крепления колонки, практически исключены утечки газа-носителя, даже при выборе максимальных температур. Колонка Ultra ALLOY®-5 была разработана как раз для анализа опасных для окружающей среды веществ, в том числе летучих только при высоких температурах (алкилфенолов, таких как БФА и нонилфенолы, а также сложных эфиров фталатов в виде свободных форм на уровне ppb без сложной предварительной пробоподготовки [14].

БФА идентифицировали масс-спектру из библиотеки NIST20 (см. рис.):

Совпадение экспериментального масс-спектра и спектра из библиотеки NIST20 составляло 98%.

Известно, что метод ГХ-МС может быть реализован с использованием различных газов-носителей [16]. Из-за технико-эксплуатационных свойств Agilent 8890 наиболее подходящим является «особо чистый» гелий.

Разработана [17] чувствительная метода одновременного определения БФА,

Таблица. Колонки, пригодные для прямой газовой хроматографии БФА
 Table. Columns suitable for direct BPA gas chromatography

Хроматографическая колонка	Состав неподвижной фазы	Характеристика	Температурный диапазон, °С
Rtx-5, DB-5, ZB-5	диметилполисилоксан (95%), модифицированный дифенилполисилоксаном (5%)	универсальные неполярные колонки	от -60 до 360/370
ZB-FFAP, DB-FFAP, HP-FFAP	полиэтиленгликоль, модифицированный нитротерефталатом	Колонка высокой полярности	от 40 до 250/260
ZB-1, Rtx-1, DB-1	100% диметилполисилоксан	Неполярная колонка	от -60 до 360/370
ZB-WAX, Rtx-WAX, HP-INNOWax	полиэтиленгликоль	Полярная колонка	от 40 до 250/260
Ultra ALLOY®-5	диметилполисилоксан (95%), модифицированный дифенилполисилоксаном (5%)	Неполярная	от 40 до 360/380

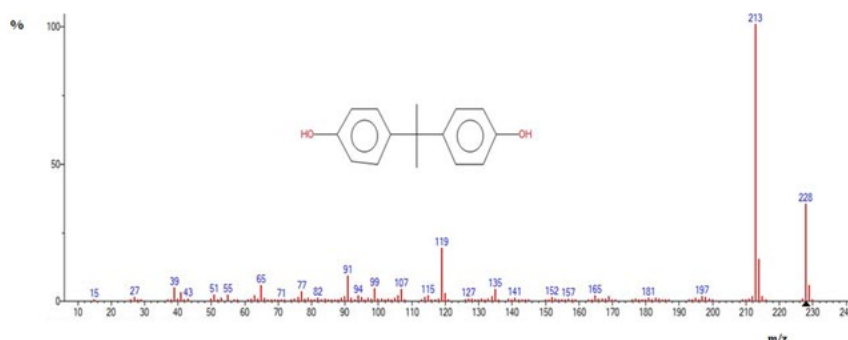


Рис. Масс-спектр бисфенола А библиотеки NIST20 [14]
 Fig. Mass spectrum of bisphenol A of the NIST20 library [14]

триклозана (ТК) и тетрабромбисфенола А (ТББФА) в сыворотке крови человека с использованием ТФЭ и ГХ-МС. Подготовка образцов включала денатурацию сывороточных белков муравьиной кислотой с последующим ТФЭ на картридже Oasis HLB, в котором фенольные соединения элюировали смесью метанол – дихлорметан (5:1, об./об.). Фенольную фракцию дополнительно дериватизировали ангидридом пентафторпропионовой кислоты (30 мин при 70°C). Для удаления избытка реагента и кислых побочных продуктов, образующихся при дериватизации, использовали дальнейшее разде-

ление ЖЖЭ с использованием смеси гексан – метанол - дихлорметан(4:1, об/об) и 3%-ного водного раствора K₂CO₃. Очищенный экстракт вводили в систему ГХ-МС.

В работе [12] методом ГХ-МС было оценено наличие фталатов, алкилфенолов, триазинов, хлорацетамидов и бисфенола А в 131 испанском источнике воды, предназначенной для розлива. Исследованными водами были родниковые воды и скважины, которые имеют защитный диаметр для минимизации загрязнения окружающей среды. Восемьдесят пять процентов образцов не содержали ни од-

ного из целевых соединений. Целевые соединения были обнаружены в очень низкой концентрации и только в очень небольшом количестве образцов. Это свидетельствует о хорошем качестве исходной воды, предназначенной для розлива, и эффективности мер защиты, принятых в Испании. Ни один из проанализированных образцов не превысил максимально допустимых уровней для питьевой воды, установленных законодательством как в Испании, так и в Европейском союзе. Вместе с тем, БФА обладает растворимостью в воде 120 мг/дм^3 , периодом полураспада в почве 75 дней, что повышает его способность к выщелачиванию. Это соединение ранее было обнаружено в промышленных грунтовых водах и в некоторых колодцах с питьевой водой в концентрациях до 32.9 мкг/дм^3 .

Пробы были собраны непосредственно из 131 источника воды, соответствующего 40 родникам и 91 скважине, расположенных по всей Испании. Все эти воды имеют обозначение природной минеральной воды или родниковой воды. Образцы, собранные из скважин, находились на глубине от 24 до 400 м. В этих образцах общее содержание органического углерода всегда составляло $<1 \text{ мг/дм}^3$. В качестве газа-носителя использовался гелий с постоянным расходом при $1.2 \text{ см}^3/\text{мин}$. Колонка DB-5MS ($30 \text{ м} \times 0.25 \text{ мм} \times 0.25 \text{ мкм}$) фирмы J&W Scientific (США), градиент температуры 70°C (2 мин), $10^\circ\text{C}/\text{мин}$ до 135°C , $3^\circ\text{C}/\text{мин}$ до 160°C , $1^\circ\text{C}/\text{мин}$ до 175°C , $3^\circ\text{C}/\text{мин}$ до 195°C и $10^\circ\text{C}/\text{мин}$ до 310°C (5 мин). Общее время анализа составило 55 минут. Объем пробы составил 2 мкл. Образцы были сначала проанализированы в режиме сканирования с использованием диапазона масс 75-450 а.е.м. для оптимизации условий сбора, а затем в режиме мониторинга выбранных ионов для идентификации и количественного определения целевых соединений. Целевые соединения определяли количественно методом внутреннего стандарта. Бисфенол А

был одним из наиболее часто обнаруживаемых соединений (в шести источниках) в концентрациях между 0.031 и 0.203 мкг/л. Он был обнаружен в неглубоких скважинах, расположенных в муниципальных районах, или родниках, на которые могут воздействовать поверхностные воды.

Описана экологически чистая система предварительной обработки образцов, основанная на твердофазной микроэкстракции (ТФМЭ) для чувствительного определения бисфенола А (БФА), бисфенола S (БФС) и бисфенола (БФВ). Проведено сравнение двух реакций дериватизации с получением летучих производных. Дериватизацию уксусным ангидридом проводили *in situ* в буферном растворе $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{NaHCO}_3$. Для дериватизации бис(триметилсилил)трифторацетамидом анализируемые вещества сначала экстрагировали, затем экстракт сушили, а после дериватизации анализируемые вещества десорбировали в инъекционном отверстии хроматографа в режиме без разделения при 280°C в течение 4 мин [12]. Разделение осуществляли путем ГХ-МС. Эта методика позволила определить уровни миграции бисфенолов, обнаруженных в банках из-под пищевых продуктов – пределы обнаружения варьировались от 3 до 16 пг/см^3 , в зависимости от соединения, при соотношении сигнал/шум, равном 3. Уровни БФА были выше, чем у БФС, а самое низкое содержание было обнаружено у БФВ. Для определения аналитов в пищевых продуктах были выбраны температуры 25°C и 80°C и разное время контакта в диапазоне 0-240 ч. Были также найдены значения для повышенной температуры и был проведен сравнительный анализ бисфенолов с использованием двух реакций дериватизации.

Так вот, пределы обнаружения были лучше при использовании силилирующего реагента, чем ацетилирующего, также были примерно в 100 раз лучше, чем те, которые были получены без дериватизации.

В работе [6] методом ГХ-МС исследовалось содержание БФА в водах, почвах и донных отложениях, при этом использовалось концентрирование в динамических условиях с применением молекулярно импринтированного сорбента ($\text{Fe}_3\text{O}_4@$ МИП-БФА) с отпечатками бисфенола А (БФА) для его последующего определения на уровне ультрамикрочисел.

Высокоэффективная жидкостная хроматография

Высокоэффективная жидкостная хроматография (ВЭЖХ) и ультраэффективная жидкостная хроматография (УЭЖХ) стали альтернативными ГХ-МС способами определения БФА, на смену ультрафиолетовым или спектрофотометрическим детекторам пришли масс-спектрометры. ЖХ-МС аппаратно более сложный, чем ГХ-МС, а, следовательно, более дорогой метод анализа. Однако одним из преимуществ ЖХ-МС является то, что он не требует этапа дериватизации.

Например, в работе [7] анализировали пробы воды. Они были отобраны методом твердофазной экстракции (ТФЭ). Процедура ТФЭ для очистки и концентрирования проб воды проводилась с использованием стеклянного картриджа C18 upi-clean® с торцевой крышкой 200 мг (Interchim, Франция). Картриджи кондиционировали с помощью 4 см³ смеси дихлорметан/гексан (50:50) и дважды 3 см³ смеси метанол/ацетон/этилацетат (2:2:1) и затем уравнивали 5 см³ очищенной воды. Пробы воды (250 мл) пропускали через влажные картриджи, промывали 5 см³ очищенной воды и сушили в течение 15 мин. Для всех этих этапов скорость потока была установлена на уровне 10 см³/мин. Элюирование проводили смесью гексан/дихлорметан (50:50 об./об.) и смесью метанол/ацетон/этилацетат (2:2:1 об./об./об.) при скорости потока 2 см³/мин. Экстракты выпаривали при температуре 40°C до высыхания под слабой струей азота. Остатки растворяли

в 250 мкл смеси очищенной воды/метанола (50:50). Наконец, 25 мкл экстракта вводили в аппарат ЖХ-МС/МС.

В работе [7] методом ВЭЖХ-МС/МС/МС в окружающей среде определяли концентрацию БФА, хлорпроизводных БФА и нонилфенол. В качестве колонки для ВЭЖХ применили Supelcosil ABZ® (размер частиц 3 мкм, 150×4.6 мм; Supelco, США). Анализ БФА и хлорпроизводных БФА проводили с использованием программы градиента подвижной фазы при скорости потока 1 см³/мин. Исходным состоянием подвижной фазы было соотношение метанол/вода 50:50 (об./об.). Градиент был запрограммирован таким образом, чтобы линейно увеличивать количество метанола до 99% в течение 10 мин.

Пределы обнаружения варьировались от 0.3 до 2.3 нг/дм³ для бисфенола А и хлорированного бисфенола А от 1.4 до 63.0 нг/дм³. БФА был обнаружен в большинстве проанализированных проб воды на уровне от 2.0 до 29.7 нг/дм³, нонилфенол – от 0 до 124.9 нг/дм³, соответственно. В большинстве случаев наблюдалось снижение содержания БФА и нонилфенола в поверхностных водах и очищенной воде. Ни хлорированного БФА, ни хлорированного нонилфенола обнаружено не было. Несмотря на то, что концентрации этих этих контаминантов в питьевой воде не высоки, питьевая вода может оставаться источником их воздействия на человека.

Определению БФА в пластиковой пищевой таре, имеющей обращение во Вьетнаме методом ВЭЖХ-МС/МС посвящены работы [19-21]. Стандартные растворы БФА готовили в смеси ацетонитрил-этилацетат (85:15), в диапазоне концентраций 20-200 нг/см³, чтобы построить градуировку. Образцы материала измельчали до размера 5×5 мм и взвешивали на аналитических весах массу навески ~ 0.5 г. Навеску помещали в коническую плоскодонную колбу и прили-

вали 10 см³ смеси ацетонитрил – этилацетат (85:15), встряхивали 15 мин на вибросмесителе. Отбирали 10 мкл пробы и анализировали на ГХ-МС Shimadzu (Япония), колонка InertSustain C18 (5 мкм × 150 мм × 4.6 мм). Подвижная фаза – ацетонитрил – вода, градиент. Из 5 образцов пластиковой тары в двух образцах обнаружено 5.5 и 10.2 мг/кг БФА, в остальных образцах, если и присутствовал БФА, то его концентрация была ниже чувствительности методики. Анализ выполнен в аккредитованной Laboratory of Food Chemistry and Toxicology National Institute for Food Control, г. Ханой.

В работе [5] представлен новый метод, основанный на обработке пробы ДЖЖМЭ, содержащей шесть бисфенолов (бисфенол А, бисфенол S и монохлор-, дихлор-, трихлор- и тетрахлорбисфенол А), четыре парабена (метил-, этил-, пропил- и бутилпарабен) и шесть бензофенонов (бензофенон-1, бензофенон-2, бензофенон-3, бензофенон-6, бензофенон-8 и 4-гидроксибензофенон) в образцах мочи человека с последующей УЭЖХ-МС/МС.

Пределы количественной оценки варьируются от 0.1 до 0.6 нг/см³, относительные стандартные отклонения – от 2.0 до 13.8 %. Методика была удовлетворительно применена для определения целевых соединений в образцах мочи человека, взятых у 20 случайно отобранных индивидуумов. Таким образом, идентификация и количественное определение свободных и суммарных концентраций шести бисфенолов, четырех парабенов и шести бензофенонов в образцах мочи человека были успешно проведены с использованием метода ДЖЖМЭ-УЭЖХ-МС/МС/МС.

В работе [18] была исследована закономерность миграции соединений, связанных с БФА, из покрытий банок в консервы и имитатора на масляной основе. Количественное определение и подтверждение этих соединений были выполнены с помощью высокоэффективной

жидкостной хроматографии в сочетании с тандемной масс-спектрометрией (УЭЖХ-МС/МС/МС). Была исследована корреляция между молекулярной массой, временем миграции, начальной концентрацией и уровнем миграции загрязняющих веществ. По количественному соотношению структура–свойство (QSPR) была создана соответствующая модель миграции этих мигрантов в маслянистом имитаторе при 55°C, что послужило ускоренным тестированием срока годности с использованием повышенной температуры для имитации длительного хранения при комнатной температуре.

Коэффициенты корреляции (R) и внешней валидации (Qext) для установленной модели были выше 0.9000. Более того, применение разработанной модели было предварительно апробировано на трех маслянистых консервах, результаты которых показали, что модель может играть важную роль в обеспечении справочника по оценке миграционного поведения соединений, связанных с бисфенолом-А, в консервированных продуктах.

Для определения БФА в безалкогольных напитках методом ВЭЖХ был разработан чувствительный и селективный способ метод с использованием 2-(11Н-бензо[а]карбазол-11-ил)этилхлороформата (БКЭХФ) в качестве дериватизирующего реагента для ВЭЖХ с детектором флуоресценции [22]. Чувствительность ВЭЖХ к бисфенолу А и алкилфенолам была значительно повышена за счет введения в молекулы-мишени фрагмента БКЭХФ, обладающего превосходными флуоресцентными свойствами. Между тем, внедрение высокоэффективного гидрофобного фрагмента БКЭХФ в аналиты также значительно повышал гидрофобность целевых соединений и отличал их от гидрофильных матриц. Таким образом, наблюдалось мало помех. ТФЭ с использованием картриджа C18 применялась для процедуры очистки образцов с извлечением более 82%. Когда для анализа использовали 20 см³ пробы, пределы

количественного определения анализируемых веществ составляли от 0.06 до 0.1 мг/дм³. Предложенный в [22] метод был успешно применен для определения целевых соединений в образцах безалкогольных напитков с гораздо более высокой чувствительностью, выше, чем у традиционных методов ВЭЖХ. Кроме того, этот метод был применен к 21 образцам человеческой сыворотки. Средние концентрации, полученные для БФА – 0.71 нг/см³.

Классические методы фотоиндуцированной флуоресценции проводятся в два этапа: этап ультрафиолетового облучения с целью образования фотоиндуцированного соединения с последующим его флуориметрическим определением. Разработан способ прямого облучения анализируемого вещества во флуориметрической ячейке с целью образования фотоиндуцированного флуоресцентного соединения и его прямого флуориметрического обнаружения в течение короткого времени облучения [23]. Облучение проводится с помощью настраиваемого лазера для выбора оптимальной длины волны возбуждения. Облучение бисфенола А при 230 нм приводит к образованию фотоиндуцированного соединения со значительно более высоким квантовым выходом флуоресценции и специфическими длинами волн возбуждения/излучения. В водопроводной воде флуоресценция бисфенола А линейно возрастает в зависимости от его концентрации, и ее определение с помощью прямой лазерной фотоиндуцированной флуоресценции позволяет получить нижний предел обнаружения 17 мг/дм³. Хроматографическое разделение БФА и его фотоиндуцированного соединения осуществляли методом ВЭЖХ с детекцией флуоресценции. Длина волны возбуждения составляла 230 нм. А хроматограмма, записанная при 310 и 410 нм показала время удерживания БФА и фотоиндуцированного соединения, соответственно, 2.38 и 4.21 мин.

Тонкослойная хроматография

Что касается тонкослойной хроматографии, привлекает сочетание низкотемпературной ЖЖЭ, ТСХ и цифровой цветометрии [24]. Процедура анализа заключается в следующем: из водной матрицы, содержащей БФА, выдержанной при -10°C, со смесью ацетонитрил – этилацетат (85:15) или ацетонитрил – ИПС – этилацетат (80:5:15), после расслоения водной и органических фаз, микрошприцом отбирали верхний органический слой (5 мкл) и анализировали методом ТСХ в сочетании с цветометрией, при этом использовали параллельно 2 цветные реакции: 1) с 0.1 н. раствором KMnO₄ в разбавленной уксусной кислоте CH₃COOH (желтые пятна на розовом фоне); 2) со смесью хлорида железа (III) и феррицианида калия (синие пятна). Для контроля отверждения эпоксидной смолы по содержанию свободного бисфенола А методом ТСХ [25] образцы измельчали и взвешивали на аналитических весах массу навески ~0.5 г с точностью ±0.002 г. Навеску помещали в коническую плоскодонную колбу и приливали мерным цилиндром 10 мл смеси ацетонитрил – этилацетат (85 : 15 об. %). Колбу закрывали притертой пробкой и встряхивали 15 минут на орбитальном шейкере OS-20. После этого микрошприцем отбирали 5 мкл раствора для анализа методом ТСХ. Определение проводили на тонкослойной пластине марки Sorbfil (Краснодар), размером 12.5×5 см, сорбент – силикагель с зернением 5-12 мкм. Пробу – 5 мкл анализируемого раствора, наносили на линию старта. Пластины помещали в стеклянную камеру с 30 мл подвижной фазы (хлороформ – этилацетат – уксусная кислота, 50:50:1). Для проявления хроматографических пятен БФА применяли две цветные реакции, приведенные выше. Отсканированные изображения свежих хроматографических пятен регистрировали и анализировали с помощью программы Adobe Photoshop (версия CS3). Полученные цветометрические

данные представляли в виде лепестковых диаграмм (ЛД) с 6 осями в полярных координатах, отражающих значения интенсивности (F_i) цветовых координат в модели RGB в единой последовательности $R_1, G_1, B_1, R_2, G_2, B_2$, где индекс 1 и 2 относятся к первой и второй цветным реакциям. Фигура ЛД – интегральный показатель, являющийся вторичным цифровым сигналом, полученным в результате цифровой обработки двух электронных изображений в оболочке ПО Microsoft Excel. В этом же ПО реализован алгоритм расчета геометрических размеров ЛД, коррелирующих с концентрацией БФА, имеющих для различных фенольных соединений индивидуальный профиль. Использование низкотемпературной ЖЖЭ носит универсальный характер, этот способ пробоподготовки пригоден и для ТСХ, и для ВЭЖХ, и для оптических методов анализа.

Заключение

Таким образом, современные хроматографические способы, особенно, в тан-

деме с масс-спектрометрическим детектированием, позволяют определять вплоть до ультрамикрочислительных содержания бисфенола А в технических материалах, пищевой и бытовой продукции, в биологических жидкостях, в объектах окружающей среды на фоне других контаминантов. Для подготовки проб БФА, как в случае газовой хроматографии, так и методов жидкостной хроматографии, используют усовершенствованные сорбционные и экстракционные способы, а также их комбинации: жидкостно-жидкостную экстракцию гидрофобными растворителями и при низких температурах ацетонитрильными растворами, твердофазную экстракцию на обращенно-фазовых сорбентах, динамическую жидкостно-жидкостную экстракцию, метод *QuEChERS*.

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

1. Шварцльмюллер Э., Бругер Х. Аспекты влияния упаковки для напитков на здоровье/Информация об экологической политике. № 185. Режим доступа: http://barley-malt.ru/wp-content/uploads/2014/03/yssledovanye-ruet_avstryja.pdf. Вена, 2011 г. 73 с. Дата обращения 25.05.2023.
2. Рудаков О.Б., Рудакова Л.В. Бисфенол А: с чем его едят? // *Переработка молока*. 2019. № 6(236). С. 24-26.
3. Рудаков О.Б., Рудакова Л.В. Опасен ли бисфенол А в консервах? // *Мясные технологии*. 2019. № 7(199). С. 24-27.
4. Сперанская О.А., Гурский Я.Г. Миграция бисфенола А из бутылок для питья многоразового использования, поступающих на российский рынок //

Химическая безопасность. 2021. Т. 5, № 2. С. 186-199.

5. Vela-Soria F., Ballesteros O., Zafra-Gómez A., Ballesteros L., Navalón A. UHPLC-MS/MS method for the determination of bisphenol A and its chlorinated derivatives, bisphenol S, parabens, and benzophenones in human urine samples // *Anal. Bioanal. Chem.* 2014. Vol. 406 (15). P. 3773-3785.

6. Губин А.С., Кушнир А.А., Суханов П.Т. Он-лайн концентрирование с применением магнитного молекулярно импринтированного сорбента и ГХ-МС определение бисфенола А в природных средах // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2023. Т.23, №2. С. 244-254.

7. Dupuis A., Migeot V., Cariot A., Albouy-Llaty M., Legube B., Rabouan S. Quantification of bisphenol A, 353-



- nonylphenol and their chlorinated derivatives in drinking water treatment plants // *Environmental Science and Pollution Research*. 2012. Vol. 19(9). P. 4193-4205.
8. Feshin D.B., Fimushkin P.V., Brodskii E.S., Shelepchikov A.A., Mir-Kadyrova E.Ya., Kalinkevich G.A. Determination of bisphenol A in foods as 2,2-bis-(4-(isopropoxycarbonyloxy)phenyl)propane by gas chromatography/mass spectrometry // *Journal of Analytical Chemistry*. 2012. Vol. 67, no 5. P. 460-466.
9. Cunha S. C., Cunha C., Ferreira A. R., Fernandes J. O. Determination of bisphenol A and bisphenol B in canned seafood combining QuEChERS extraction with dispersive liquid-liquid microextraction followed by gas chromatography-mass spectrometry // *Anal. Bioanal. Chem.* 2012. No 404. P. 2453-2463.
10. Амелин В. Г., Королев Д. С., Третьяков А. В. Сочетание метода QuEChERS с дисперсионной жидкостно-жидкостной микроэкстракцией и получением производных при определении диэтилстильбэстрола и бисфенола А в продуктах питания методом газожидкостной хроматографии // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология*. 2012. Т. 12, № 4. С. 17-22.
11. Королев, Д. С., Амелин В. Г., Третьяков А. В. Газожидкостная хроматография и дисперсионная жидкостно-жидкостная микроэкстракция при определении бисфенола А и диэтилстильбэстрола в воде и напитках // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2013. Т. 13, № 3. С. 266-272.
12. Vono-Blay F., Guart A., De la Fuente B., Pedemonte M., Pastor M.C., Borrell A., Lacorte S. Survey of phthalates, alkylphenols, bisphenol A and herbicides in Spanish source waters intended for bottling // *Sci. Pollut. Res.* 2012. no 19. P. 3339-3349.
13. Vinas P., Campillo N., Martinez-Castillo N., Hernandez-Cordoba M. Comparison of two derivatization-based methods for solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometric determination of bisphenol A, bisphenol S and biphenol migrated from food cans // *Anal. Bioanal. Chem.* 2010. no 397. P. 115-125.
14. Рудаков Я.О., Селеменев В.Ф., Шелехова Н.В., Рудаков О.Б., Хорохордин А.М. Метод газовой хромато-масс-спектрометрии для определения свободного бисфенола А в этанольных экстрактах // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2023. Т. 23, № 1. С. 6-17
15. Рудаков О.Б., Хорохордин А.М., Рудаков Я.О., Хорохордина Е.А. Применение пиролитической хромато-масс-спектрометрии в контроле качества строительных полимеров и композитов // *Строительные материалы*. 2022. № 8. С. 65-69.
16. Бёккер Ю. Хроматография. Инструментальная аналитика: методы хроматографии и капиллярного электрофореза. М.: Техносфера. 2009. 458 с.
17. Dirtu A.C., Roosens L. Geens T., Gheorghe A. Neels H., Covaci A. Simultaneous determination of bisphenol A, triclosan, and tetrabromobisphenol A in human serum using solid-phase extraction and gas chromatography-electron capture negative-ionization mass spectrometry // *Anal. Bioanal. Chem.* 2008. no 391. P.1175-1181.
18. Na Lin, Yinyan Zou, Hong Zhang. Kinetic migration studies of bisphenol-A-related compounds from can coatings into food simulant and oily foods // *Eur. Food Res. Technol.* 2013. no 237. P.1009-1019.
19. Чан Х.Д., Хорохордина Е.А., Рудаков О.Б. Хромато-масс-спектрометрическое определение бисфенола А в пластиковой таре // *Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного*



материаловедения. 2015. № 2(11), С. 94-98.

20. Рудаков О.Б., Хорохордина Е.А., Чан Х.Д., Рудакова Л.В. Применение МС-ВЭЖХ в определении бисфенола А в пищевой пластиковой таре, используемой во Вьетнаме // *Аналитика Сибири и Дальнего Востока: материалы X Всеросс. научной конф. с междунар. участием, Барнаул, 12-17 сентября 2016 г. Барнаул: Алтайский гос. ун-т, 2016. С. 147.*

21. Yanxin Li, Shijuan Zhang, Cuihua Song, Jinmao You. Determination of Bisphenol A and Alkylphenols in Soft Drinks by High-Performance Liquid Chromatography with Fluorescence Detection. *Food Anal. Methods.* 2013. no 6. P.1284-1290.

22. Maroto A., Kissingou P. Diascorn A., Benmansour B., Deschamps L. Stephan L. Cabon J.-Y. Giamarchi P. Direct laser photo-induced fluorescence determination of bisphenol A // *Anal. Bioanal. Chem.* 2011. no 401. P. 3011-3017.

23. Рудаков О.Б., Хорохордина Е.А., Рудакова Л.В., Чан Х.Д. Определение бисфенола А, триклозана и нонилфенола в материалах и экстрактах методом ТСХ, совмещенным с цифровой цветометрией // *Сорбционные и хроматографические процессы. 2016. Т. 16, № 5. С. 686-694.*

24. Рудаков О.Б., Хорохордина Е.А., Глазков С.С. Контроль отверждения эпоксидной смолы по содержанию свободного бисфенола А методом ТСХ // *Аналитика и контроль. 2017. Т. 21, № 2. С. 135-143.*

25. Рудаков О.Б., Хорохордина Е.А. Экспрессные методы контроля качества и безопасности технических материалов. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2017. 103 с.

References

1. Shvarczl`myuller E`., Bruger X. Aspekty` vliyaniya upakovki dlya napitkov na zdorov`e/Informaciya ob e`kologicheskoy politike. № 185. Rezhim dostupa: [\[ley-malt.ru/wp-content/uploads/2014/03/ysledovanye-pyet_avstryja.pdf\]\(http://bar-ley-malt.ru/wp-content/uploads/2014/03/ysledovanye-pyet_avstryja.pdf\). Vena, 2011 g. 73 s. Data obrashheniya 25.01.2023.\(In Russ.\)](http://bar-</p></div><div data-bbox=)

2. Rudakov O.B., Rudakova L.V. Bisfenol A: s chem ego edyat? *Pererabotka moloka.* 2019; 6(236): 24-26. <https://doi.org/10.33465/2222-5455-2019-6-24-26> (In Russ.)

3. Rudakov O.B., Rudakova L.V. Opasen li bisfenol A v konservax? *Myasny`e texnologii.* 2019; 7(199): 24-27. <https://doi.org/10.33465/2308-2941-2019-7-24-27> (In Russ.)

4. Speranskaya O.A., Gurskij Ya.G. Migraciya bisfenola A iz buty`lok dlya pit`ya mnogorazovogo ispol`zovaniya, postupayushhix na rossijskij ry`nok. *Ximicheskaya bezopasnost`.* 2021; 5(2): 186-199. <https://doi.org/10.25514/CHS.2021.2.20012> (In Russ.)

5. Vela-Soria F., Ballesteros O., Zafra-Gómez A., Ballesteros L., Navalón A. UHPLC-MS/MS method for the determination of bisphenol A and its chlorinated derivatives, bisphenol S, parabens, and benzophenones in human urine samples. *Anal. Bioanal. Chem.* 2014; 406 (15): 3773-3785. <https://doi.org/10.1007/s00216-014-7785-9>

6. Gubin A.S., Kushnir A.A., Suxanov P.T. On-lajn koncentrirovanie s primeneniem magnitnogo molekulyarno imprintirovannogo sorbenta i GX-MS opredelenie bisfenola A v prirodny`x sredax. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy.* 2023; 23(2): 244-254. <https://doi.org/10.17308/sorp-chrom.2023.23/11148> (In Russ.)

7. Dupuis A., Migeot V., Cariot A., Albouy-Llaty M., Legube B., Rabouan S. Quantification of bisphenol A, 353-nonylphenol and their chlorinated derivatives in drinking water treatment plants. *Environmental Science and Pollution Research.* 2012; 19(9): 4193-4205. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-0972-3>

8. Feshin D.B., Fimushkin P.V., Brodskii E.S., Shelepchikov A.A., MirKadyrova E.Ya., Kalinkevich G.A. Determination of



- bisphenol A in foods as 2,2-bis-(4-(isopropoxycarbonyloxy)phenyl)propane by gas chromatography/mass spectrometry. *Journal of Analytical Chemistry*. 2012; 67(5): 460-466.
9. Cunha S. C., Cunha C., Ferreira A. R., Fernandes J. O. Determination of bisphenol A and bisphenol B in canned seafood combining QuEChERS extraction with dispersive liquid-liquid microextraction followed by gas chromatography-mass spectrometry. *Anal. Bioanal. Chem.* 2012; 404: 2453-2463. <https://doi.org/10.1007/s00216-012-6389-5>
10. Amelin V. G., Korolev D. S., Tret'yakov A. V. Sochetanie metoda QuEChERS s dispersionnoj zhidkostno-zhidkostnoj mikroekstrakciej i polucheniem proizvodny'x pri opredelenii die'tilstil'be'strola i bisfenola A v produktax pitaniya metodom gazozhidkostnoj xromatografii. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Ximiya. Biologiya. Ekologiya*. 2012; 12(4): 17-22. (In Russ.)
11. Korolev D.S., Amelin V.G., Tret'yakov A.V. Gazozhidkostnaya xromatografiya i dispersionnaya zhidkostno-zhidkostnaya mikroekstrakciya pri opredelenii bisfenola A i die'tilstil'be'strola v vode i napitkax. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2013; 13(3): 266-272. (In Russ.)
12. Bono-Blay F., Guart A., De la Fuente B., Pedemonte M., Pastor M.C., Borrell A., Lacorte S. Survey of phthalates, alkylphenols, bisphenol A and herbicides in Spanish source waters intended for bottling. *Sci. Pollut. Res.* 2012; 19: 3339-3349. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-0851-y>
13. Vinas P., Campillo N., Martinez-Castillo N., Hernandez-Cordoba M. Comparison of two derivatization-based methods for solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometric determination of bisphenol A, bisphenol S and biphenol migrated from food cans. *Anal. Bioanal. Chem.* 2010; 397: 115-125. <https://doi.org/10.1007/s00216-010-3464-7>
14. Rudakov Ya.O., Selemenev V.F., Shelexova N.V., Rudakov O.B. Xoroxordin A.M. Gas chromatography-mass spectrometry method for the determination of free bisphenol A in ethanol extracts. *Sorbtsionnye I khromatograficheskie protsessy*. 2023; 23(1): 6-17. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/10989> (In Russ.)
15. Rudakov O. B., Xoroxordin A. M., Rudakov Ya. O., Xoroxordina E. A. Primenenie piroliticheskoy xromato-mass-spektrometrii v kontrole kachestva stroitel'ny'x polimerov i kompozitov. *Stroitel'ny'e materialy*. 2022; 8: 65-69. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-65-69> (In Russ.)
16. Byokker Yu. Xromatografiya. Instrumental'naya analitika: metody xromatografii i kapillyarnogo e'lektroforeza. M., Texnosfera. 2009. 458 p. (In Russ.)
17. Dirtu A.C., Roosens L. Geens T., Gheorghe A. Neels H., Covaci A. Simultaneous determination of bisphenol A, triclosan, and tetrabromobisphenol A in human serum using solid-phase extraction and gas chromatography-electron capture negative-ionization mass spectrometry. *Anal. Bioanal. Chem.* 2008; 391: 1175-1181. <https://doi.org/10.1007/s00216-007-1807-9> (In Russ.)
18. Na Lin, Yinyan Zou, Hong Zhang. Kinetic migration studies of bisphenol-A-related compounds from can coatings into food simulant and oily foods. *Eur. Food Res. Technol.* 2013; 237: 1009-1019. <https://doi.org/10.1007/s00217-013-2003-0>
19. Chan X. D., Xoroxordina E. A., Rudakov O. B. Xromato-mass-spektrometricheskoe opredelenie bisfenola A v plastikovoj tare. *Nauchny'j vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arxitekturostroitel'nogo universiteta. Seriya: Fiziko-ximicheskie problemy i vy'sokie texnologii stroitel'nogo materialovedeniya*. 2015; 2(11): 94-98. (In Russ.)
20. Rudakov O.B., Xoroxordina E.A., Chan X.D., Rudakova L.V. Primenenie MS-VE'ZhX v opredelenii bisfenola A v pishhevoj plastikovoj tare, ispol'zuemoj vo V'etname. *Analitika Sibiri i Dal'nego Vostoka: materialy X Vseross. nauchnoj konf. s*



mezhdunar. uchastiem, Barnaul, 12–17 sentyabrya 2016 g. Barnaul: Altajskij gos. un-t, 2016: 147. (In Russ.)

21. Yanxin Li, Shijuan Zhang, Cuihua Song, Jinmao You. Determination of Bisphenol A and Alkylphenols in Soft Drinks by High-Performance Liquid Chromatography with Fluorescence Detection. *Food Anal. Methods*. 2013; 6: 1284-1290. <https://doi.org/10.1007/s12161-012-9541-0>

22. Maroto A., Kissingou P. Diascorn A., Benmansour B., Deschamps L. Stephan L. Cabon J.-Y. Giamarchi P. Direct laser photo-induced fluorescence determination of bisphenol A // *Anal. Bioanal. Chem.* 2011; 401; 3011-3017. <https://doi.org/10.1007/s00216-011-5375-7>

23. Rudakov O.B., Xoroxordina E.A., Rudakova L.V., Chan X.D. Opredelenie

bisfenola A, triklozana i nonilfenola v materialax i e`kstraktax metodom TSX, sovmeshenny`m s cifrovoj czvetometriej. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2016; 16(5); 686-694. (In Russ.)

24. Rudakov O.B., Xoroxordina E.A., Glazkov S.S. Kontrol` otverzheniya e`poksidnoj smoly` po sodержaniyu svobodnogo bisfenola A metodom TSX. *Analitika i kontrol`*. 2017; 21(2): 135-143. <https://doi.org/10.15826/analitika.2017.21.2.004> (In Russ.)

25. Rudakov O. B. Xoroxordina E.A. E`kspressny`e metody` kontrolya kachestva i bezopasnosti texnicheskix materialov. *Voronezh: Voronezhskij gosudarstvenny`j texnicheskij universitet*, 2017. 103 s. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Я.О. Рудаков – инженер кафедры химии и химической технологии материалов Воронежского государственного технического университета, аспирант кафедры аналитической химии Воронежского государственного университета Воронеж, Россия

В.Ф. Селеменев – д.х.н., проф. каф. аналитической химии, Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

А.М. Хорохордин – руководитель Центра коллективного пользования Воронежского государственного технического университета, Воронеж, Россия

А.А. Волков – студент, Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

Ya.O. Rudakov – of Department of chemistry and chemical technology of materials of Voronezh state technical University, postgraduate student of the Department of Analytical Chemistry of Voronezh State University Voronezh, Voronezh, Russia, e-mail: robi57@mail.ru

V.F. Selemenev – DSci in chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: common@chem.vsu.ru

A.M. Khorokhordin – Head of the Center for Collective Use of Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

A.A. Volkov – student of Department of Biochemistry and Cell Physiology, Voronezh State University, Voronezh, Russia

Статья поступила в редакцию 10.07.2023; одобрена после рецензирования 13.08.2023; принята к публикации 16.08.2023.

The article was submitted 10.07.2023; approved after reviewing 13.08.2023; accepted for publication 16.08.2023.