

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 543.544

**ПРИМЕНЕНИЕ МАТРИЧНОГО ТВЕРДОФАЗНОГО  
ДИСПЕРГИРОВАНИЯ В СОЧЕТАНИИ С ГАЗОВОЙ  
ХРОМАТОГРАФИЕЙ-МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
БИСФЕНОЛА А В ПРЕСНОВОДНЫХ РЫБАХ**

**Александр Сергеевич Губин, Алексей Алексеевич Кушнир,  
Павел Тихонович Суханов**

Воронежский государственный университет инженерных технологий, факультет экологии и химической технологии, Воронеж, Россия

**Автор, ответственный за переписку:** Александр Сергеевич Губин,  
goubinne@mail.ru

**Аннотация.** Предложено матричное твердофазное диспергирование с применением магнитного сорбента на основе гуматов как эффективный способ концентрирования бисфенола А из образцов мышечной ткани и печени рыб с дальнейшим определением аналита методом газовой хроматографии-масс-спектрометрии с предварительной дериватизацией уксусным ангидридом. В оптимальных условиях концентрирования (время перемешивания пробы 10 мин, масса сорбента 0,05 г) степень извлечения бисфенола А при однократной сорбции достигает 85%, степень десорбции (элюат – метанол, время 3 мин, объем 1 мл) превышает 99%, максимальное значение коэффициента концентрирования составляет 718. Предел определения бисфенола А в мышечной ткани составил 0,15 мкг/кг (в пересчете на сухой вес), в печени – 0,25 мкг/кг.

**Ключевые слова:** бисфенол А, матричное твердофазное диспергирование, ГХ-МС, магнитные сорбенты, пресноводные рыбы, определение

DOI: 10.55959/MSU0579-9384-2-2024-65-5-431-439

**Для цитирования:** Губин А.С., Кушнир А.А., Суханов П.Т. Применение матричного твердофазного диспергирования в сочетании с газовой хроматографией-масс-спектрометрией для определения бисфенола А в пресноводных рыбах // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 2024. Т. 65. № 5. С. 431–439.

SCIENTIFIC ARTICLE

**APPLICATION OF MATRIX SOLID-PHASE DISPERSION COMBINED  
WITH GAS CHROMATOGRAPHY–MASS SPECTROMETRY FOR THE  
DETERMINATION OF BISPHENOL A IN FRESH-WATER FISHES**

**Alexander S. Gubin, Aleksei A. Kushnir, Pavel T. Sukhanov**

Faculty of Ecology and Chemical Technology, Voronezh State University  
of Engineering Technologies, Voronezh, Russian Federation

**Corresponding author:** Alexander S. Gubin, goubinne@mail.ru

**Abstract.** Matrix solid-phase dispersion using of a humate-based magnetic sorbent is proposed as an efficient method for the concentration of bisphenol A

from fish muscular and hepatic tissue samples followed by the chromatography-mass spectrometry determination of analyte pre-derivatized with acetic anhydride. Under the optimum concentration conditions (the stirring time was 10 min and the sorbent weight was 0.05 g), the recovery of bisphenol A upon single sorption reached 85%. The percentage desorption exceeded 99% (the eluate was methanol, the time was 3 min, and the volume was 1 mL). The maximum concentration factor was 718. The limit of detection of bisphenol A was 0.15 µg/kg (on dry basis) for the muscular tissue and 0.25 µg/kg for liver.

**Keywords:** bisphenol A, matrix solid-phase dispersion, GC-MS, magnetic sorbents, fresh-water fishes, determination

**For citation:** Gubin A.S., Kushnir A.A., Sukhanov P.T. Application of matrix solid-phase dispersion combined with gas chromatography–mass spectrometry for the determination of bisphenol a in fresh-water fishes // Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 2. Chemistry. 2024. T. 65. № 5. S. 431–439.

Бисфенолы относятся к группе веществ (несколько десятков соединений, в том числе фтор-, хлор- и бромпроизводных), негативно влияющих на эндокринную систему из-за структурного сходства с молекулой 17-β-эстрадиола [1]. Наиболее часто применяется бисфенол А (БФА) [2]. Его долю оценивают в 95–98%. Бисфенолы практически нерастворимы в воде, их концентрация редко превышает несколько десятков нанogramм на литр, поэтому вероятные пути их поступления в речную биоту не ограничиваются эмиссией из воды [3]. Одним из возможных вариантов проникновения является поглощение микропластика из воды. В организме микрочастицы пластика под действием ферментов расщепляются до мономеров, которые накапливаются в определенных органах и тканях.

Наиболее представительным объектом для изучения накопления бисфенолов в водных экосистемах являются мышечные ткани и печень рыб. В работе [4] определение БФА в мышечной ткани проводили методом, сочетающим ВЭЖХ с тандемной масс-спектрометрией при ионизации электрораспылением. Предварительную очистку проб проводили методом аффинной хроматографии. Проанализированы 44 образца рыб, и только в 1/3 из них БФА содержался в детектируемых количествах (0,6–3,2 нг/г). В дельте р. Жемчужная (Китай) проанализировали 19 образцов рыб [5]. Концентрирование проб проводили методом твердофазной микроэкстракции с применением патронов Oasis. Определение БФА выполняли методом, сочетающим ВЭЖХ и тандемную масс-спектрометрию. Концентрация БФА в мышечной ткани колебалась от 0,5 до 2,0 нг/г.

При исследовании содержания БФА в рыбе, обитающей в Тирренском море (Италия), уста-

новлено, что концентрация БФА в мышечной ткани намного ниже, чем в печени [6]. В качестве объектов исследования выбраны такие виды рыб, как сарпа (сальпа), кефаль, белый лещ, большеротый окунь, а также рыбы рода Умбрины. Концентрация БФА составила 2–6 (печень) и 1–2 (мышцы) мкг/кг. Определение проводили методом ВЭЖХ с предварительным концентрированием на картридже Sep-Pak Light Florisil. Проведено также исследование нахождения БФА в тканях головного мозга рыб, обитающих в водных объектах около Питтсбурга (США). Установлено, что концентрация БФА колеблется в пределах от 0,3 до 120 мкг/кг. Детектирование аналита проводили методом ВЭЖХ с предварительным концентрированием на патроне C18 Oasis HLB 5 [7].

Большое исследование проведено по накоплению БФА и других бисфенолов в мышечной ткани и печени рыб [8]. Определение проводили методом ГХ-МС. Проанализированы сотни образцов лавраки (*Dicentrarchus labrax*), ставриды (*Trachurus trachurus*) и африканской скумбрии (*Scomber colias*). В мышечной ткани лавраки максимальная концентрация БФА достигала 75 нг/г, в печени – 200 нг/г. БФА был определен лишь в единичных образцах ставриды, его концентрация не превышала 61 нг/г. В печени концентрация была существенно выше и достигала 245 нг/г. Было проанализировано более 50 образцов африканской сумбрии, в мышечной ткани максимальная концентрация БФА составила 23 нг/г, в образцах печени установлена концентрация, превышающая 300 нг/г.

Матричное твердофазное диспергирование – один из нетрадиционных развивающихся подходов в аналитической химии, применяющийся для

очистки проб и концентрирования [9]. Обычно сорбент сразу добавляют к твердой или жидкой матрице. Анализируемый твердый образец и сорбент помещают в агатовую ступку, где их вручную перетирают с помощью пестика [10]. Для экстракции обычно применяют липофильные материалы на основе обращенных фаз  $C_8$  и  $C_{18}$  [11]. В последнее время все чаще используют углеродные материалы [12], молекулярно импринтированные полимеры [13], магнитные сорбенты и магнитные ионные жидкости [14, 15], а также гуматы [16] и другие природные материалы [17]. После сорбции образец обычно набивают в колонку и проводят элюирование подходящим растворителем [18].

Цель исследования состоит в изучении возможности применения ранее синтезированного магнитного сорбента, функционализированного гуматами ( $Fe_3O_4@SiO_2$ -НА), для извлечения бисфенолов из мышечной ткани и печени методом матричного твердофазного диспергирования с последующим определением БФА методом газовой хроматографии-масс-спектрометрии (ГХ-МС).

### Экспериментальная часть

**Приборы и реактивы.** БФА содержал не менее 98% чистого вещества («Merck»). Для удаления влаги из анализируемого образца рыбы при пробоподготовке применяли  $Na_2SO_4 \cdot 10 H_2O$  («ч.д.а», «Алхим», РФ). Перед проведением эксперимента его прокаливали до удаления кристаллизационной воды. Очистку пробы проводили с использованием *n*-гептана («х.ч.», «Ленреактив», РФ). Десорбцию БФА осуществляли с применением метанола («ос.ч.», для хроматографии, «Химмед», РФ). Центрифугирование проводили на лабораторной центрифуге «Экрос-6910» («Экросхим», РФ).

**Объекты исследования.** Речная рыба семи видов была выловлена в Воронежском водохранилище (р. Воронеж) и р. Дон (около г. Павловск). Для сравнения была приобретена прудовая рыба, выращенная в искусственных природных условиях (зарыбленный пруд). В качестве объектов исследования были использованы толстолобик (*Hypophthalmichthys molitrix*), сазан (*Cyprinus carpio*), плотва (*Rutilus rutilus*), судак (*Stizostedion lucioperca*), лещ (*Abramis brama*), карп (*Cyprinus carpio carpio*) и окунь (*Perca fluviatilis*). Эксперименты по установлению аналитических характеристик метода (предел обнаружения, ПО, диапазон линейности градуировочного графика, ДЛ) проводили на карпе, выращенном в искусственных лабораторных

условиях, максимально исключаящих потенциальное поступление БФА с кормами и водой.

**Синтез сорбента.** Синтез магнитного сорбента на основе гумата ( $Fe_3O_4@SiO_2$ -НА) проводили в несколько стадий. Сначала наночастицы  $Fe_3O_4$  покрывали оболочкой  $SiO_2$  с помощью тетраэтоксисилана. Затем модифицировали поверхность  $NH_2$ -группами с применением 3-аминопропилтриэтоксисилана (APTES). Гуминовые кислоты, выделенные из сапропеля, обрабатывали тионилхлоридом. Полученные гумилхлориды смешивали с наночастицами магнетита, покрытыми аминогруппами после обработки APTES, и диметилформамидом. После перемешивания в течение 12 ч при 60 °C получали сорбент  $Fe_3O_4@SiO_2$ -НА. Синтез магнитного сорбента на основе гумата и его свойства подробно изложены в статье [19]. Гуминовые кислоты для синтеза сорбента ранее выделяли из сапропеля [20].

**Пробоподготовка мышечной ткани рыб и проведение концентрирования.** Рыбу разрезали на мелкие куски, дважды пропускали через мясорубку. Полученный фарш разбивали блендером до консистенции паштета и помещали его в агатовую ступку, затем добавляли 5 г прокаленного  $Na_2SO_4$ . Перетирали пестиком в течение 3–5 мин до получения сухой массы. К высушенной массе добавляли 0,05 г  $Fe_3O_4@SiO_2$ -НА и продолжали перетирать еще 10 мин. Далее добавляли в ступку 20 мл *n*-гептана, взбалтывали до разрушения комка из спрессованного паштета и добавленного магнитного сорбента. После получения взвеси в ступке, ее переносили в химический стакан. Взвесь перемешивали 3 мин с помощью мешалки. Магнит прижимали к дну стакана и полностью сливали его содержимое, отделяя сорбент  $Fe_3O_4@SiO_2$ -НА. Дожидались испарения остаточных количеств растворителя. Сорбент переносили в полипропиленовую пробирку типа Эппендорф, добавляли 1 мл метанола, закрывали крышкой и центрифугировали в течение 3 мин. После десорбции фиксировали сорбент магнитом, а метанольный концентрат переливали в другой Эппендорф и упаривали досуха. Схема пробоподготовки приведена на рис. 1. Пробоподготовку печени рыб и процедуру концентрирования проводили по аналогии с подготовкой мышечных тканей рыб.

**Установление характеристик сорбционного концентрирования** проводили с применением модельных образцов толстолобика. Вычисляли степень извлечения ( $R$ , %) и коэффициент

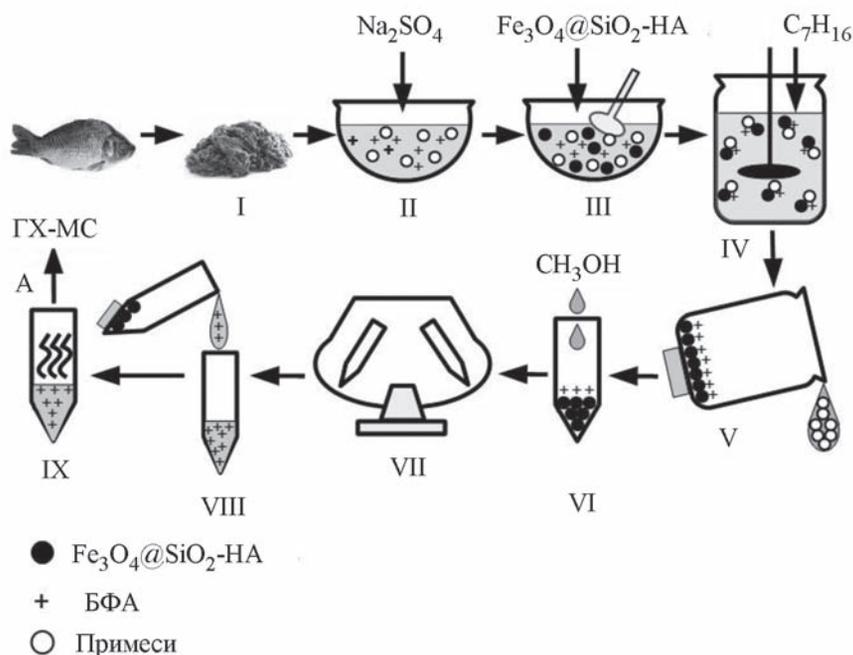


Рис. 1. Схема проведения пробоподготовки и концентрирования: I – измельчение рыбы до консистенции паштета; II – добавление сульфата натрия; III – добавление магнитного сорбента, функционализированного гуматами ( $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2\text{-HA}$ ) и перетирание его в агатовой ступке; IV – растворение спрессованного комка в гексане и образование взвеси; V – отделение сорбента методом магнитной сепарации и удаление примесей; VI – десорбция БФА метанолом; VII – перемешивание на центрифуге; VIII – отделение метанольного концентрата; IX – упаривание концентрата досуха; A – дериватизация уксусным ангидридом; ГХ-МС – определение методом газовой хроматографии-масс-спектрометрии

концентрирования ( $EF$ ) как отношение исходной концентрации аналита в рыбе к концентрации после пробоподготовки, концентрирования с применением  $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2\text{-HA}$  и упаривания концентрата. При проведении концентрирования устанавливали оптимальную продолжительность сорбции и десорбции, массу сорбента и число циклов сорбции-десорбции с минимальной потерей сорбционной емкости.

**ГХ-МС-определение бисфенола А.** К упаренному досуха экстракту приливали 300 мкл 5%-го раствора  $\text{K}_2\text{CO}_3$ , 300 мкл деионизированной воды, 100 мкл уксусного ангидрида и перемешивали 1 мин. Затем добавляли 0,2 г  $\text{NaCl}$ ; 0,5 мл *n*-бутилацетата и снова перемешивали 1 мин. Отбирали микрошприцем верхний органический слой и анализировали его методом ГХ-МС после дериватизации уксусным ангидридом, как в работе [21]. Сканирование проводили по полному ионному току в диапазоне значений массы  $m/z$  40–650 а.е.м. В режиме мониторинга использовали свойства дериватов образовывать фрагментарные ионы с  $m/z = 213$ ,  $m/z = 228$  и  $m/z = 270$ . Хроматограмма представлена на рис 2.

## Результаты и их обсуждения

Гуминовые кислоты как сорбенты имеют существенный недостаток – они частично растворяются в некоторых органических растворителях, что затрудняет проведение десорбции. Сорбенты на основе наночастиц магнетита и гуматов устойчивы к действию большинства органических растворителей. Синтезированный сорбент характеризуется высоким сродством к БФА. Это объясняется сочетанием большого числа функциональных групп (карбоксильных, карбонильных, гидроксильных, азотсодержащих и др.) и наличием гидрофобной матрицы [22]. БФА, несмотря на наличие двух  $\text{OH}$ -групп, характеризуется достаточно выраженными гидрофобными свойствами ( $\log P = 3,28$ ) [23]. Совокупность этих факторов делает гуматы эффективными материалами для матричного твердофазного диспергирования.

Оптимизация условий концентрирования БФА показала, что максимальное значение степени извлечения при однократной сорбции достигает 85% (рис. 3, а). Наиболее важную роль в достижении высоких показателей сорбции

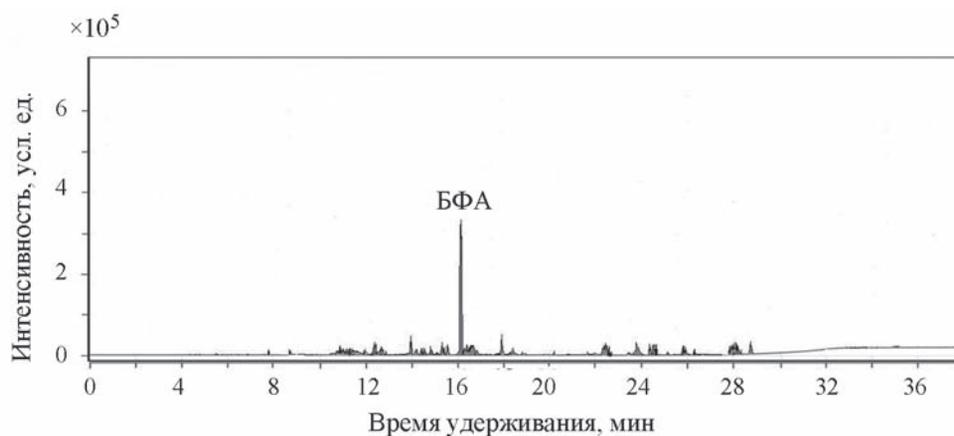


Рис. 2. Хроматограмма образца печени рыбы после проведения матричного твердофазного диспергирования

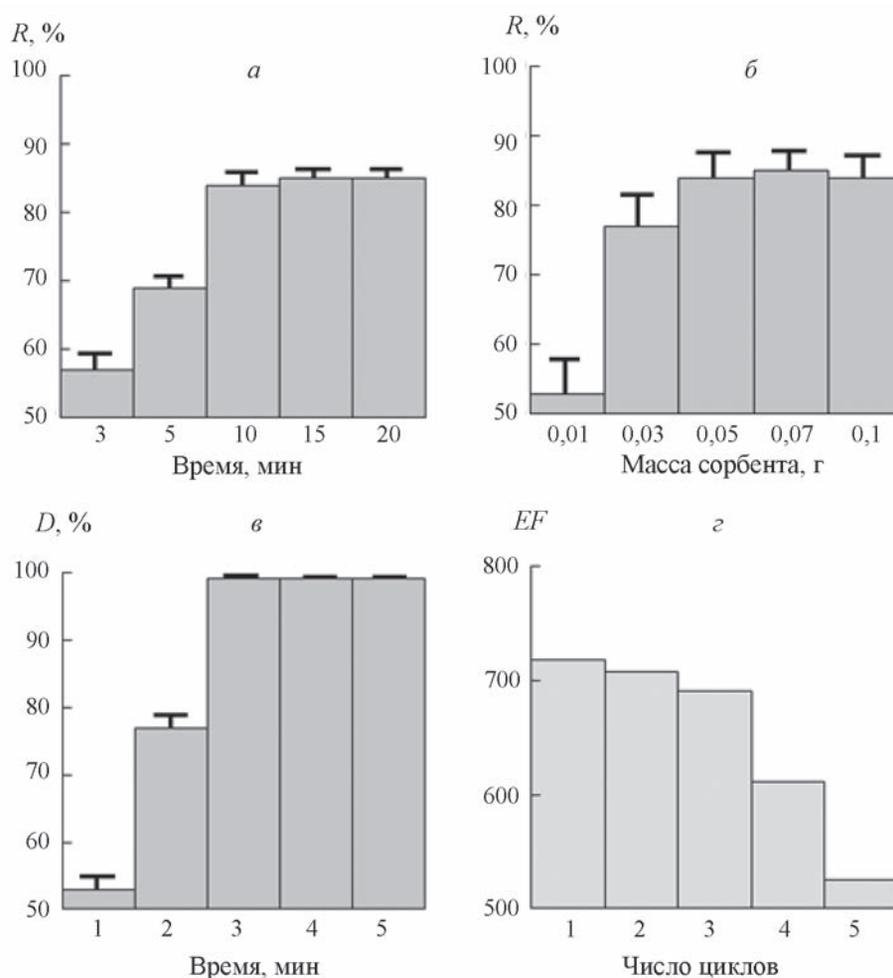


Рис. 3. Зависимость эффективности сорбции ( $R, \%$ ) от времени перемешивания (*а*) и массы сорбента (*б*); зависимость степени десорбции ( $D, \%$ ) от ее продолжительности (*в*); зависимость коэффициентов  $EF$  от числа циклов сорбции-десорбции (*з*)

играет время перемешивания (перетиранья в агатовой ступке). Поскольку эта операция проводится вручную, она вносит наибольшую погрешность в результаты определения. Точность

анализа будет зависеть от эффективности измельчения фарша блендером и полноты перетиранья фарша после добавления  $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2\text{-НА}$ . Оптимальная продолжительность измельчения

составляет 10 мин (рис. 3, а). Масса сорбента, необходимая для достижения максимальной степени извлечения составляет 0,05 г (рис. 3, б).

Существенной проблемой при анализе образцов различных тканей рыб является наличие жировых отложений. Жировая ткань включает в себя множество химических соединений. На хроматограмме это выражено большим числом достаточно интенсивных пиков. Обычно образец не удается очистить до такого содержания жиров, продуктов перекисного окисления и гидролиза (жирных кислот), при которых они не затрудняют определение БФА на уровне сотен нанограмм на килограмм или десятков микрограмм на килограмм. Среди других примесей, мешающих определению БФА в рыбе, можно выделить другие фенолы, особенно алкилфенолы и их эфиры, а также нефтепродукты и некоторые биогенные соединения. Поэтому наиболее важной стадией анализа является очистка матрицы от примесей.

Для решения этой проблемы предлагается очищать образец мышечной ткани или печени гидрофобным растворителем – *n*-гептаном. Сле-

дует отметить, что чаще всего для очистки образцов от гидрофобных примесей используется *n*-гексан. Дополнительным преимуществом по сравнению с *n*-гептаном является также хорошая летучесть и быстрая испаряемость растворителя. Например, в работе [24] *n*-гексан применен для очистки образца при анализе БФА. С другой стороны, *n*-гексан при интенсивном или длительном перемешивании, а также при воздействии ультразвука может быть эффективным экстрагентом БФА, как показано в работах [25–27]. Мы также ранее использовали *n*-гексан для извлечения БФА из донных отложений при длительном перемешивании [19]. Во избежание возможной частичной десорбции БФА для очистки матрицы в настоящей работе был применен более гидрофобный *n*-гептан.

Растворимость БФА в *n*-гептане очень низкая и составляет менее 0,01 мг/кг [28]. Жиры, продукты перекисного окисления липидов, нефтепродукты, алкилфенолы и их эфиры хорошо растворимы в *n*-гептане и эффективно удаляются из матрицы. К недостаткам растворителя можно отнести

Т а б л и ц а 1

**Результаты определения бисфенола А в мышечной ткани и печени карпа методом «введено-найденно» ( $n = 3$ ,  $P = 0,95$ )**

Введено, мкг/кг	Найдено, мкг/кг	$s_r, \%$	$r^2$	Предел обнаружения, мкг/кг	Диапазон линейности градуировочного графика, мкг/кг
Мышечная ткань					
0,2	0,16±0,02	12,0	0,994	0,05	0,15–28
0,5	0,40±0,04	9,9			
1,0	0,92±0,07	7,8			
5,0	4,7±0,3	6,8			
10,0	9,8±0,5	5,3			
20,0	19,9±0,9	4,0			
25,0	24,9±1,0	3,2			
Печень					
0,2	*	–	0,990	0,08	0,25–30
0,5	0,36±0,07	10,2			
1,0	0,93±0,06	8,1			
5,0	4,6±0,3	6,7			
10,0	9,7±0,5	5,0			
20,0	19,9±1,0	4,5			
25,0	24,9±1,2	3,4			

Т а б л и ц а 2

**Результаты определения бисфенола А в мышечной ткани и печени различных видов речных рыб  
 (n = 3, P = 0,95)**

Рыба, число образцов (N)	Масса рыбы, кг	Часть рыбы	Место вылова, координаты	Концентрация, мкг/кг
<i>Hypophthalmichthys molitrix</i> (N = 3)	2,9–4,9	мышечная ткань	Воронежское вдхр. (г. Воронеж) 51° 38' 33" с.ш. 39° 14' 05" в.д.	0,89±0,28
		печень		2,2±0,5
<i>Cyprinus carpio</i> (N = 2)	3,7–5,8	мышечная ткань	р. Дон 50° 28' 11" с.ш. 40° 02' 39" в.д.	1,5±0,3
		печень		3,9±0,4
<i>Rutilus rutilus</i> (N = 3)	0,7–1,2	мышечная ткань	Воронежское вдхр. (г. Воронеж) 51° 38' 33" с.ш. 39° 14' 05" в.д.	*
		печень		1,8±0,3
<i>Rutilus rutilus</i> (N = 2)	0,8–1,1	мышечная ткань	р. Дон 50° 28' 11" с.ш. 40° 02' 39" в.д.	–
		печень		–
<i>Stizostedion lucioperca</i> (N = 3)	2,8–3,5	мышечная ткань	р. Дон 50° 21' 52" с.ш. 40° 01' 53" в.д.	0,93±0,29
		печень		3,1±0,5
<i>Abramis brama</i> (N = 2)	0,6–1,2	мышечная ткань	Воронежское вдхр. (г. Воронеж) 51° 45' 20" с.ш. 39° 15' 35" в.д.	–
		печень		*
** <i>Cyprinus carpio carpio</i> (N = 2)	2,2–2,5	мышечная ткань	–	–
		печень		–
<i>Perca fluviatilis</i> ρ(N = 2)	0,7–1,1	мышечная ткань	р. Дон 50° 28' 11" с.ш. 40° 02' 39" в.д.	1,0±0,2
		печень		4,9±0,5

П р и м е ч а н и е: \* – ниже предела определения; \*\* – прудовая рыба, выращена в искусственных природных условиях.

более низкую летучесть и более длительное удаление из образца. На хроматограмме (рис. 2), выполненной после очистки образца, пики примесей малоинтенсивны (время удерживания 7,53–29,21 мин) и не мешают определению БФА (время удерживания 16,25 мин). Среди примесей идентифицированы (с вероятностью более 95%) биогенные амины, жирные кислоты (предельные и непредельные) и продукты их окисления.

Для десорбции применяли метанол. Эффективность десорбции оценивали по степени десорбции (D, %). Оптимальная продолжительность десорбции при использовании центрифугирования составляла 3 мин (рис. 3, в). Степень десорбции превышала 99%. Оценку возможности повторного использования сорбента проводили по коэффициенту EF, который рассчитывали как отношение концентрации БФА в исходном растворе к концентрации БФА после упаривания концентрата при пробоподготовке (рис. 1). Максимальное значение EF составляет 718 и незначительно снижается после второго и третьего циклов сорбции-десорбции до 707 и 694 соответственно. После четвертого цикла сорбции-десорбции происходит резкое снижение EF до 612. Таким образом, сорбент можно повторно использовать с минимальной потерей

гирования составляла 3 мин (рис. 3, в). Степень десорбции превышала 99%. Оценку возможности повторного использования сорбента проводили по коэффициенту EF, который рассчитывали как отношение концентрации БФА в исходном растворе к концентрации БФА после упаривания концентрата при пробоподготовке (рис. 1). Максимальное значение EF составляет 718 и незначительно снижается после второго и третьего циклов сорбции-десорбции до 707 и 694 соответственно. После четвертого цикла сорбции-десорбции происходит резкое снижение EF до 612. Таким образом, сорбент можно повторно использовать с минимальной потерей

сорбционной емкости в течение трех циклов сорбции-десорбции (рис. 3, 2).

Проверку правильности определения БФА в мышечной ткани и печени проводили методом «введено-найдено» на образцах карпа (табл. 1). Эта рыба характеризуется достаточно высоким содержанием жира и хорошо подходит в качестве сложного объекта анализа с потенциально высокими матричными эффектами. В образцах мышечных тканей ПО составил 0,05 мкг/кг (сухого веса). Несколько ниже ПО в печени. Это обусловлено содержанием большого количества жировых включений, что несколько ухудшает условия извлечения и определения. При концентрациях 0,2–5,0 мкг/кг получены заниженные на 7–28% результаты. Особенно значительно занижение результатов при концентрации 0,2–0,5 мкг/кг. Показатели правильности результатов определения БФА для значений концентрации 10 мкг/кг и более близки к 100%.

Речную рыбу для анализа отбирали из разных частей Воронежской области: более загрязненного Воронежского водохранилища (р. Воронеж) и менее загрязненных участков р. Дон около г. Богучар (табл. 2). Для сравнения была проанализирована прудовая рыба (каarp), разводимая в искусственных условиях для оценки влияния попадания БФА с кормами. Во всех образцах установлены одинаковые зависимости – концентрация БФА в печени в несколько раз выше, чем в

мышечной ткани. Из восьми образцов в четырех образцах мышечной ткани и пяти образцах печени установлено содержание БФА, позволяющее проводить количественную оценку. Максимальная концентрация БФА обнаружена в наиболее жирной рыбе – сазане. В мышечной ткани она составила 1,5 мкг/кг, в печени – 3,9 мкг/кг. В образцах карпа, выращенного в искусственных условиях, и плотве, выловленной в р. Дон около г. Богучар, БФА не детектируется как в мышечной ткани, так и в печени.

### Заключение

Сорбент на основе наночастиц магнетита, функционализированный гуматами, успешно применен для концентрирования БФА из образцов мышечной ткани и печени рыб методом матричного твердофазного диспергирования. Определение БФА после концентрирования проводили методом ГХ-МС с предварительной дериватизацией уксусным ангидридом. Для уменьшения влияния примесей (жиры, нефтепродукты, алкилфенолы и их эфиры) в ходе пробоподготовки образцов проводили очистку матрицы с применением *n*-гептана. ПО составил 0,05 мкг/кг (в пересчете на сухой вес) в мышечной ткани и 0,08 мкг/кг (в пересчете на сухой вес) в печени. Метод применен для скрининга содержания БФА в речной рыбе. Наибольшее содержание БФА установлено в печени сазана и составляет 3,9 мкг/кг.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Dat V.V., Long L.K., Trang N.H., Phuc D.V., Trang N.V., Ha N.T.T // ChemChemTech. 2019. Vol. 62. N 5. P. 31 (DOI: 10.6060/ivkkt.20196205.5933).
- Fonseca M.I., Lorigo M., Cairrao E. // J. Xenobiot. 2022. Vol. 12. N 3. P. 181 (DOI: 10.3390/jox12030015).
- Fuerhacker M. // Water Sci. Technol. 2003. Vol. 47. N 10. P. 117 (DOI: 10.2166/wst.2003.0553).
- Di Marco Pisciotano I., Mita G.D., Gallo P. // Food. Addit. Contam. Part B. 2020. Vol. 13. N 2. P. 139 (DOI: 10.1080/19393210.2020.1740335).
- Wei X., Huang Y., Wong M.H., Giesy J.P., Wong C.K.C. // Chemosphere. 2011. Vol. 85. N 1. P. 122 (DOI: 10.1016/j.chemosphere.2011.05.038).
- Mita L., Bianco M., Viggiano E., Zollo F., Benciven-ga U., Sica V., Monaco G., Portaccio M., Diano N., Colonna A., Lepore M., Canciglia P., Mita D.G. // Chemosphere. 2011. Vol. 82. N 3. P. 405 (DOI: 10.1016/j.chemosphere.2010.09.071).
- Renz L., Volz C., Michanowicz D., Ferrar K., Christian C., Lenzner D., El-Hefnawy T. // Ecotoxicology. 2013. Vol. 22. N 4. P. 632 (DOI: 10.1007/s10646-013-1054-0).
- Barboza L.G.A., Cunha S.C., Monteiro C., Fernandes J.O., Guilhermino L. // J. Hazard. Mater. 2020. Vol. 393. P. 122419 (DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122419).
- Fedotov P.S., Malofeeva G.I., Savonina E.Y., Spivakov B.Y. // J. Anal. Chem. 2019. Vol. 74. P. 205 (DOI: 10.1134/S1061934819030043).
- Xu L., Lee H.K. // Comprehensive Sampling and Sample Preparation. 2012. Vol. 3. P. 541 (DOI: 10.1016/B978-0-12-381373-2.00100-9).
- Karasova G., Brandsteterova E., Lachova M. // Czech J. Food Sci. 2003. Vol. 21. P. 219.
- Wang X., Du T., Wang J., Kou H., Du X., Lu X. // New J. Chem. 2018. Vol. 42. P. 6778 (DOI: 10.1039/C8NJ00942B).
- Guo L., Guan M., Zhao C., Zhang H. // Anal. Bioanal. Chem. 2008. Vol. 392. N 7-8. P. 1431 (DOI: 10.1007/s00216-008-2454-5).
- Yuanpeng W., Ying S., Bo X., Xinpei L., Xinghua W., Hanqi Z., Daqian S. // Anal. Chim. Acta. 2015. Vol. 888. P. 67 (DOI: 10.1016/j.aca.2015.07.028).
- Diao C., Li C., Yang X., Sun A., Liu R. // Microchim. Acta. 2016. Vol. 183. N 3. P. 1261 (DOI: 10.1007/s00604-016-1761-3).

16. Zhou N.-Z., Liu P., Su X.-C., Liao Y.-H., Lei N.-S., Liang Y.-H., Zhou, S.-H., Lin W.-S., Chen J., Feng Y.-Q., Tang Y. // *Anal. Chim. Acta*. 2017. Vol. 970. P. 38 (DOI: 10.1016/j.aca.2017.02.029).
17. Yang Z., Chen Y., Jia J., Hou C., Xuan R., Wang T. // *Anal. Bioanal. Chem.* 2022. V. 414. N 17. P. 4897 (DOI: 10.1007/s00216-022-04114-3).
18. Barker S.A. // *J. Biochem. Biophys. Methods*. 2007. Vol. 70. N 2. P. 151–162 (DOI: 10.1016/j.jbbm.2006.06.005).
19. Gubin A.S., Sukhanov P.T., Kushnir A.A. // *Mendeleev Commun.* 2023. Vol. 33. P. 285 (DOI: 10.1016/j.mencom.2023.02.044).
20. Gubin A.S., Sukhanov P.T., Kushnir A.A. // *Moscow Univ. Chem. Bull.* 2019. Vol. 74. P. 257 (DOI: 10.3103/S0027131419050055).
21. Kotowska U., Kapelewska J., Sturgulewska J. // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2014. Vol. 21. N 1. P. 660 (DOI: 10.1007/s11356-013-1904-6).
22. de Melo B.A., Motta F.L., Santana M.H. // *Mater. Sci. Eng. C Mater. Biol. Appl.* 2016. Vol. 62. P. 967 (DOI: 10.1016/j.msec.2015.12.001).
23. Hansch C., Leo A., Hoekman D. *Exploring QSAR – Hydrophobic, Electronic, and Steric Constants*. Washington, DC: American Chemical Society. 1995. P. 131.
24. Arar S., Alawi M. // *Acta Chromatographica*. 2019. Vol. 31. N 1. P. 71 (DOI: 10.1556/1326.2017.00388).
25. Huelsmann R., Martendal E. // *J. Braz. Chem. Soc.* 2020. Vol. 31. N 8 P. 1575 (DOI: 10.21577/0103-5053.20200043).
26. Caban M., Stepnowski P. // *Microchem. J.* 2020. Vol. 153. P. 104392 (DOI: 10.1016/j.microc.2019.104392).
27. Notardonato I., Protano C., Vitali M., Bhattacharya B., Avino P.A. // *Appl. Sci.* 2019. Vol. 9. N 14. P. 2945 (DOI: 10.3390/app9142945).
28. O’Neil. M.J. *The Merck Index – An Encyclopedia of Chemicals, Drugs, and Biologicals*. Cambridge, UK: Royal Society of Chemistry. 2013. P. 226.

### **Информация об авторах**

Александр Сергеевич Губин – доцент кафедры промышленной экологии и техносферной безопасности Воронежского государственного университета инженерных технологий, канд. хим. наук, доцент (goubinne@mail.ru);

Алексей Алексеевич Кушнир – доцент кафедры промышленной экологии и техносферной безопасности Воронежского государственного университета инженерных технологий, канд. хим. наук (kushnir\_aleksei@mail.ru);

Павел Тихонович Суханов – профессор кафедры физической и аналитической химии Воронежского государственного университета инженерных технологий, докт. хим. наук, профессор (pavel.suhanov@mail.ru).

### **Вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### **Соблюдение этических стандартов**

Комиссия по биоэтике ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» одобрила проведение авторами настоящей статьи эксперимента с использованием различных видов рыб.

Статья поступила в редакцию 10.09.2023;  
одобрена после рецензирования 16.09.2023;  
принята к публикации 25.03.2024.