

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-1-29-35>

Поступила 21.10.2024

Поступила после рецензирования 21.02.2025

Принята в печать 25.02.2025

© Утьянов Д. А., Вострикова Н. Л., Василевская Е. Р., Куликовский А. В., Карабанов С. Ю., 2025

<https://www.fsjour.com/jour>

Обзорная статья

Open access

ХИМИЧЕСКИЕ КОНТАМИНАНТЫ, ПОПАДАЮЩИЕ В ПИЩЕВУЮ ПРОДУКЦИЮ ИЗ ПОЛИМЕРНОЙ УПАКОВКИ. ОБЗОР

Утьянов Д. А.*[†], Вострикова Н. Л., Василевская Е. Р., Куликовский А. В., Карабанов С. Ю.

Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова, Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

пищевая продукция,
пищевая упаковка,
химические
контаминанты,
полимерная упаковка

В статье приведен обзор научной литературы, посвященной проблеме контаминации пищевой продукции различного рода веществами из упаковочных материалов. Рассматриваемая проблема масштабна — существует большое количество видов соединений, которые могут попасть в пищевую продукцию из упаковки. Контаминация пищевой продукции может происходить за счет миграции веществ, используемых для производства упаковочного материала. Наибольший риск загрязнения пищевого продукта представляют пластиковые полимерные упаковки. Интерес научного сообщества и необходимость изучения описываемой темы обусловлены тем, что преобладающая доля всех соединений, которые мигрируют в пищевой продукт из упаковки, обладают токсической или канцерогенной активностью, поэтому представляют потенциальный риск для здоровья человека. Из всех описанных в настоящей статье контаминантов наиболее изученными являются бисфенолы. Большое количество исследований по их миграции в пищевые продукты показали, что бисфенолы были обнаружены практически во всех видах пищевой продукции: мясная, молочная, рыбная, фруктовая, овощная. Значительная миграция бисфенолов наблюдается в соковой продукции и в бутилированной воде. Ввиду неблагоприятного воздействия бисфенола А на организм человека его использование в производстве упаковочных материалов для пищевой продукции запрещено. Однако этот запрет привел к распространению аналогов, а именно бисфенолов В, С, Ф, АФ и пр., которые обнаруживаются в пищевых продуктах. Проведенный обзор показал, что проблема загрязнения пищевой продукции контаминантами из упаковочных материалов требует серьезного внимания со стороны научного сообщества.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследования проводились в рамках государственного задания ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН FGUS-2024-0002.

Received 21.10.2024

Accepted in revised 21.02.2025

Accepted for publication 25.02.2025

© Utyanov D. A., Vostrikova N. L., Kulikovskii A. V., Vasilevskaya E. R., Karabanov S. Yu., 2025

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Review article

Open access

CHEMICAL CONTAMINANTS ENTERING FOOD PRODUCTS FROM POLYMER PACKAGING. REVIEW

Dmitry A. Utyanov*, Natalia L. Vostrikova, Andrey V. Kulikovskii,

Ekaterina R. Vasilevskaya, Sergey Yu. Karabanov

V. M. Gorbato Federal Research Center for Food Systems, Moscow, Russia

KEY WORDS:

food products, food
packaging, chemical
contaminants, polymer
packaging

ABSTRACT

The paper presents a review of scientific literature devoted to the problem of food product contamination with various types of substances from packaging materials. The problem under consideration is large-scale — there are many types of compounds that can enter food products from packaging. Food product contamination can occur due to migration of substances used for production of packaging materials. Plastic polymer packages represent the highest risk of food product contamination. The interest of the scientific community and the need for studying the described theme are determined by the fact that the prevailing proportion of all compounds that migrate into a food product from packaging possesses toxic or carcinogenic activity, and thus, presents the potential risk for human health. Bisphenols are most studied among all contaminants described in this paper. Many studies on their migration into food products have shown that bisphenols were found practically in all types of food products: meat, dairy, fish, fruit and vegetable. The significant migration of bisphenols has been observed in juice products and bottled water. Due to the adverse effect of bisphenol A on the human body, its use in the production of packaging materials for food products is forbidden. However, this ban has led to distribution of analogs, namely, bisphenols B, C, F, AF and others, which are found in food products. The performed review has shown that the problem of food product contamination with contaminants from packaging materials requires serious attention of the scientific community.

FUNDING: The article was published as part of the research topic No. FGUS-2024-0002 of the state assignment of the V. M. Gorbato Federal Research Center for Food Systems of RAS.

1. Введение

Темпы роста производства пищевой продукции диктуют необходимость увеличения производства периферии, связанной с пищевой продукцией, среди которой упаковочные материалы и материалы для этикетирования. Широкое применение имеет упаковка, изготовленная из пластических масс на основе полимерных материалов. Преимуществами данной упаковки являются низкая проницаемость (в сравнении, например, с целлюлозой), относительная инертность

к пищевым продуктам и высокая устойчивость к разрушению. Благодаря этим свойствам снижается риск миграции нежелательных соединений в продукт. В то же время риск контаминации пищевого продукта из-за контакта с упаковочным материалом все же существует. Загрязнение пищевого продукта происходит в основном двумя способами: попаданием в него остатков полимеров и реагентов, образующихся и используемых при производстве упаковочного материала, и попаданием в него побочных химических продуктов производства

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Утьянов, Д. А., Вострикова, Н. Л., Василевская, Е. Р., Куликовский, А. В., Карабанов, С. Ю. (2025). Химические контаминанты, попадающие в пищевую продукцию из полимерной упаковки. Обзор. *Пищевые системы*, 8(1), 29–35. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-1-29-35>

FOR CITATION: Utyanov, D. A., Vostrikova, N. L., Kulikovskii, A. V., Vasilevskaya, E. R., Karabanov, S. Yu. (2025). Chemical contaminants entering food products from polymer packaging. Review. *Food Systems*, 8(1), 29–35. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-1-29-35>

упаковочного материала. Законодательство ЕАЭС строго регламентирует допустимый уровень таких веществ. В ТР ТС 005/2011¹ приведен широкий перечень нормируемых в полимерных упаковочных материалах, контактирующих с пищевым продуктом, веществ — преимущественно спиртов, альдегидов и алканов. Практически все приведенные в ТР ТС 005/2011¹ соединения обеспечены методиками их определения, однако данные методики применимы в основном для исследования самой упаковки. С другой стороны, если безопасность упаковочного материала доказана, а его производство сертифицировано, контроль уровня этих соединений в пищевом продукте нецелесообразен: дополнительные исследования привели бы к удорожанию пищевой продукции.

Контаминация пищевой продукции соединениями, образующимися при производстве упаковочных материалов, представляет собой более сложную проблему. Ученым известны далеко не все продукты возможных реакций при производстве упаковочных материалов, что затрудняет выявление и контроль образующихся веществ. Для известных или предполагаемых продуктов таких реакций сначала разрабатывают методики определения в упаковке, а затем — в пищевом продукте, с последующей оценкой степени загрязнения.

Пластические массы стали неотъемлемой частью многих сфер человеческой деятельности. Бесконтрольное применение полностью синтетических пластмасс (на основе поливинилхлорида, полиэтилена и т. п.) привело к двум глобальным проблемам: к накоплению пластиковых отходов и к загрязнению ими окружающей среды. В последнее время активно растет количество публикаций, подтверждающих факт обнаружения частиц микропластика в тканях животных и человека. Причем накопление частиц микропластика происходит в самых разных тканях организма: в толстом кишечнике [1], в яичках [2], в эндометрии [3], в плаценте [4], в легких [5] и даже в разных тканях скелета (кости, межпозвоночные диски и хрящи) [6]. В наибольшей степени попадание частиц пластика в организм человека происходит через полости носа и рта, т. е. через дыхание и потребление их с напитками и пищей.

В связи с этим целью настоящего обзора было проведение литературного анализа работ, посвященных вопросу загрязнения пищевой продукции контаминантами из упаковочных материалов.

2. Материалы и методы

Для составления обзора в соответствии с поставленной целью был проведен поиск научно-исследовательских работ на английском языке, рецензируемых в базах данных Scopus и Web Of Science. Первоначальными ключевыми словами были «food package», «food package pollutants», «bisphenols», «bisphenol A», «plastic polymer food packaging», «determination of contaminants from food packaging», «plasticizers», «plasticizers determination in foods», «food package additives». В первую очередь были отобраны работы не старше пяти лет с момента публикации. Работы старше пяти лет использовались при необходимости.

3. Химические контаминанты, попадающие в пищевую продукцию из полимерной упаковки

Контаминанты, попадающие в пищевую продукцию из упаковки, можно разделить на три группы: частицы упаковочного материала; вещества, образовавшиеся при его производстве; вещества, добавленные для придания упаковке определенных свойств.

3.1. Диоксид титана

Одним из примеров веществ, которые внесли или которыми работали упаковку для придания ей каких-либо свойств или характеристик, является диоксид титана (TiO₂). Диоксид титана широко применяется в пищевой промышленности в том числе в качестве пищевой добавки (индекс E171). Благодаря биосовместимости и антибактериальным свойствам, диоксид титана используется как функциональный нанонаполнитель при производстве биоразлагаемых пищевых пленок. Это вещество в составе пищевой пленки способствует уменьшению ее толщины, улучшению цвета, а также придает ей антибактериальные, барьерные, светозащитные и механические свойства [7].

Как отмечалось ранее, диоксид титана широко используется в пищевой промышленности в качестве пищевой добавки и разрешен во многих странах мира, в том числе в России. Но начиная с 2020 года диоксид титана был запрещен к использованию во Фран-

ции, а в 2021 году Европейское агентство по безопасности продуктов питания (EFSA) начало разрабатывать план по запрету его использования на территории ЕС в качестве пищевой добавки [8]. Такое разнообразие в законодательстве разных стран относительно использования диоксида титана связано с противоречащими друг другу исследованиями: с одной стороны, растет количество публикаций, которые подтверждают его канцерогенные, мутагенные и генотоксичные свойства [9,10]. Влияние наночастиц диоксида титана на плод, в том числе пренатальное, также вызывает опасения, например, возможное замедление развития [11]. С другой стороны, существуют исследования, подтверждающие его безопасность [12].

Растущее число работ, доказывающих вредное воздействие диоксида титана на организм человека, позволяет прогнозировать скорый запрет на его применение в пищевой промышленности в качестве пищевой добавки. Однако вред от потребления диоксида титана не должен быть поводом отказываться от его использования в качестве наполнителя для полимерных упаковочных материалов, учитывая, как сильно он может улучшить характеристики упаковки. Для оценки безопасности необходимо определить содержание диоксида титана в пищевых продуктах и оценить степень его миграции из упаковки. Это позволит убедиться, что миграция либо отсутствует, либо находится на безопасном уровне. Работы по выявлению степени миграции диоксида титана в пищевой продукт из упаковки уже ведутся, однако пока его определяют не в конкретном пищевом продукте, а в модельных системах [13,14]. В результате было установлено, что количества переходящего в продукт диоксида титана были на уровне ≈ 0,65 нг/мл. Этот показатель, как заявляют авторы, представляет собой довольно низкие концентрации — даже ниже норм, предусмотренных законодательством ЕС [8]. Тем не менее необходима разработка методик для определения содержания диоксида титана в различных пищевых продуктах, а не в идеальных условиях модельных систем. Во-первых, это позволит устанавливать наличие диоксида титана в пищевых продуктах в случае его запрета в качестве пищевой добавки. Во-вторых, это позволит проводить более объективные исследования по вопросу миграции диоксида титана в пищевые продукты различных видов из оболочки.

3.2. 2-бензотиазолитио метил тиоцианат

Другой добавкой в производстве упаковочных материалов является 2-бензотиазолитио метил тиоцианат (ТСМТВ). ТСМТВ — фунгицид, который используется для обработки в том числе упаковочных материалов на бумажной основе для борьбы с плесенью. Как и любой другой фунгицид, ТСМТВ неблагоприятен для живого организма, а из-за своей нестабильности он легко разлагается до 2-меркаптобензотиазола, который оказывает влияние на кожу и слизистую оболочку, вызывая тем самым дерматит, язвы кожи и аллергические реакции [15,16].

В работе [17] авторы создали методику определения ТСМТВ с помощью иммуноферментного анализа. Исследователи отказались от использования ГХ–МС и ВЭЖХ–МС/МС методов, которые широко используются для определения фунгицидов в сторону иммуноферментного анализа, так как он дешевле, быстрее и удобнее, чем упомянутые методы. ТСМТВ таким способом определяют непосредственно в самой упаковке. Методики выявления его в пищевом продукте в настоящее время отсутствуют. Однако в них нет острой необходимости. Как и в случае с показателями, регулируемые ТР ТС 005/2011, соблюдение норм концентрации веществ в упаковке позволяет предположить их безопасность и в самом пищевом продукте.

3.3. Полифторалкилированные вещества

Переходя к веществам, которые используются при производстве упаковок, в первую очередь, стоит сказать об одних из наиболее распространенных веществ — пер- и полифторалкилированные вещества (PFAS). PFAS — химические соединения, в которых атомы водорода частично или полностью замещены фтором. Благодаря тому, что связь углерод-фтор — одна из наиболее сильных связей, известных органической химии, PFAS не разрушаются при высоких температурах, труднорастворимы и в воде, и в жирах. Они используются не только при производстве пищевой упаковки [18,19], но и при производстве гидравлических жидкостей, красок, чернил, огнетушащих пен, пестицидов, полиролей для поверхностей, антипригарных поверхностей и пр. [20,21]. PFAS обладают иммунотоксичными канцерогенными свойствами [22,23] и могут быть причиной развития рака почек и яичек. Учитывая многообразие источников попадания PFAS в окружающую среду и организм человека, а также их потенциальную опасность для здоровья населения, контролю этих веществ (особенно в пищевой упаковке) следует уделять особое внимание

¹ ТР ТС 005/2011 Технический регламент Таможенного союза. О безопасности упаковок. Утвержден Решением Комиссии Таможенного союза от 16 августа 2011 года № 769.

из-за риска значительной миграции в продукты. Такой вывод можно сделать на основании результатов работы [24], в которой авторы исследовали упаковку для ресторанов быстрого питания во Франции. Согласно полученным данным, PFAS в упаковке были обнаружены в концентрациях до 287 нг/г. Исследования ограничились анализом упаковки, сами пищевые продукты не изучались. Высокое содержание PFAS и их канцерогенные свойства, обнаруженные в упаковке, обуславливают необходимость создания методики определения этих веществ в пищевых продуктах. Исследования миграции PFAS из упаковки в продукты позволят оценить реальный риск развития рака при употреблении таких продуктов.

3.4. Контаминация пищевого продукта частицами упаковочного материала

Говоря об исследованиях по вопросам миграции в пищевую продукцию частиц самого упаковочного материала или веществ, образующихся в результате производства упаковочного материала, т. е. непреднамеренно добавленных веществ, можно сказать, что такие исследования были первыми в области контаминации веществами из изделий, контактирующих с пищевой продукцией. Поэтому большая часть работ опубликована именно в этом направлении, а сами исследования ведутся уже относительно давно. Особенный интерес у научного сообщества появился с началом широкого применения так называемой «удобной» пластиковой упаковки, или бумажной упаковки, покрытой полимерными материалами. Связано это с тем, что люди в «удобной» упаковке греют еду в микроволновых печах, а микроволновое излучение так или иначе провоцирует разбухание полимеров, оказывает влияние на целостность пластика [25] и даже может приводить к образованию соединений, вступающих во взаимодействие с натуральными компонентами пищи [26].

Рядом работ доказано, что частицы пластика из упаковки в пищевой продукт переходят не только из-за микроволнового излучения, но и при других условиях. Так, в работе [27] изучали вопрос миграции контаминантов из пластиковой упаковки в продукцию для детского питания. В результате был установлен факт миграции в продукт 42 контаминантов из упаковки. Из которых 34 компонента самой упаковки и 8 веществ, которые изначально не использовались при производстве упаковки. Которые, как утверждают авторы, были обнаружены вообще впервые. Среди обнаруженных контаминантов были адипиновая кислота, моноэтиленгликоль, диэтиленгликоль, фталевая кислота, неопентилгликоль, себациновая кислота, бутандиол, себуриновая кислота, гександиол, пропандиол по отдельности или их комбинации. Все они были обнаружены в продуктах качественно за исключением двух олигомеров, концентрацию которых удалось рассчитать за счет наличия стандартных образцов. Их концентрация была выше 10 мкг/кг, что превышает нормы, установленные для продукции детского питания. Важно отметить, что исследованная продукция не подвергалась дополнительному термическому воздействию (например, нагреву в микроволновой печи). Контаминанты мигрировали в продукт либо в процессе производства (при наличии термической обработки), либо во время хранения [27].

Говоря о пластиковой таре, важно понимать, что риск миграции частиц или производных пластика существует не только из пластиковой упаковки, в которую упаковывают пищевые продукты на производстве, но и из пластиковых контейнеров для домашней еды. Что и было доказано в работе [28]. В ней авторы изучали вопрос миграции ди(2-этилгексил)фталата (ДЭГФ) и ди-н-бутилфталата (ДБФ) из полипропиленовых пищевых контейнеров для хранения пищевой продукции, приобретенных в местных магазинах, с маркировкой о допустимости греть в них еду в микроволновой печи и мыть их в посудомоечных машинах. Сами анализы, ДЭГФ и ДБФ, являются фталатными пластификаторами, которые широко используются в производстве пластиковых материалов, и их наличие выявляют в пищевых продуктах уже относительно давно [29]. Сами фталатные пластификаторы не встраиваются в полимерную матрицу упаковочного материала из-за своих химических свойств, поэтому остаются в свободной форме и легко выщелачиваются, испаряются и мигрируют в пищевой продукт, тем самым серьезно повышая риск их попадания в организм перорально, через дыхательные пути или через кожу. Результаты токсикологических исследований на животных и людях показали, что фталатные пластификаторы могут быть причиной серьезных нарушений развития и репродуктивной функции [30,31]. В экспериментах на грызунах побочные эффекты от них были по большей части выявлены для таких органов-мишеней, как печень, почки, иногда для щитовидной железы и яичек. Их воздействие сильно зависит от дозы и пола испытуемого [32,33]. Несмотря на установленные токсикологические эффекты фталатов [33], большин-

ство из них обладают довольно низкой острой токсичностью с LD₅₀ на уровне 30г/кг веса [34].

Возвращаясь к результатам исследования миграции ДЭГФ и ДБФ [28]: в ходе выполнения работы авторы сымитировали пищевую среду путем использования жидкостей с рН в диапазоне от 3 до 9, которые помещали в контейнеры и нагревали в микроволновых печах в течение 1–5 минут. Наивысшие уровни миграции ДЭГФ и ДБФ были при наименьшем значении рН = 3, при этом их концентрация была прямо пропорциональна продолжительности нагрева в микроволновой печи. Наивысшие концентрации, обнаруженные авторами, составляли 159,8 и 104,9 мкг/л для ДЭГФ и ДБФ соответственно.

Аналогичные исследования приведены в работе [35]. В ней авторы приобрели в местных магазинах 200 единиц пищевой продукции в полимерной упаковке: 80 единиц в бумажной упаковке, покрытой полиэтиленом, 80 — в упаковке из полипропилена, и 40 — в полистерене. Далее из упаковки была удалена пищевая продукция, а сама упаковка промыта дистиллированной водой. Затем в упаковку наливали 20% раствор этанола и подвергали разным способом воздействию: заливали кипятком для имитации процесса заваривания лапши быстрого приготовления или грели в микроволновой печи в течение двух минут для имитации процесса разогрева пищи. Подвергнув растворы описанным условиям, определяли в них содержание фенола, ацетофенона, 4-пропилбензальдегида, 2-этил-1-гексанола, 2,4-ди-трет-бутилфенола, бутилированного гидрокситолуола, 2,2,4-триметил-1,3-пентандиолдиизобутирата и 2,6-ди-трет-бутил-Р-бензохинона. В результате исследований установлено, что содержание определяемых аналитов варьировалось в диапазоне от 4,2 до 39,3 мкг/л, но были и образцы, в которых они находились на уровне ниже предела обнаружения использованной методики. Наибольшие концентрации получены в образцах, упаковка которых подвергалась многократному воздействию микроволнового излучения, что приводило к более выраженному набуханию полимера и, соответственно, к его более серьезному разрушению. Но в то же время авторы заявляют, что такие концентрации не представляют риска для здоровья человека [35].

Вопрос миграции частиц пластика из полимерной упаковки в пищевую продукцию в результате воздействия микроволнового излучения исследован довольно тщательно. Так, в очередной работе [36] авторы исследовали миграцию полиэтилен терефталата в различные имитаторы пищевых продуктов. Факт миграции исследователями был установлен. Также в статье показано, что при нагревании тары в микроволновой печи миграция находится на значительно более высоком уровне, чем при нагревании конвекционным способом при тех же температурах. Но аналогично с работой [35] авторы заявляют, что количества мигрирующих в пищевую продукт фталатов не опасны для человека, т. к. находятся ниже предельного установленного уровня Европейской Комиссией (10 мг с 1дм² упаковочного материала).

Аналогичные исследования были проведены в работе [37]. В ней авторы исследовали миграцию компонентов из рукавов для запекания в различные имитаторы пищевой продукции и в мясо птицы в результате воздействия на них нагреванием микроволновым излучением и конвекционным способом. Среди имитаторов пищевой продукции были 10% раствор этанола, 95% раствор этанола и растительные масла. Среди имитаторов пищевой продукции был установлен факт миграции только в 10% раствор этанола. Что касается мяса птицы, то в ней были обнаружены 27 веществ, мигрирующих из рукава для запекания, большая часть которых — это альдегиды и кетоны, которые в том числе оказывают серьезное влияние на аромат и вкус продукт. Авторы подчеркивают, что большее их количество образуется при термической обработке конвекционным способом, нежели при нагревании в микроволновой печи. Случай миграции в мясо птицы соединений, образующихся в рукавах для готовки из-за высоких температур, достигаемых в духовке, говорит о необходимости контроля материалов, из которых производят рукава для запекания [37].

3.5. Фотоинициаторы

Другие вещества, которые могут попасть в пищевую продукт из упаковки — фотоинициаторы. В отличие от большей части соединений, описанных ранее, фотоинициаторы используются не для производства полимерной пластиковой упаковки, а добавляются в чернила, которые применяются для нанесения маркировки на упаковку, для их отверждения под воздействием УФ-излучения. Казалось бы, в таком случае они не могут попасть в пищевую продукт, т. к. используются с наружной стороны упаковки. Однако в 2009 году учеными Германии было доложено в Европейскую комиссию, что в мясли,

произведенных в Бельгии, был обнаружен 4-метил бензофенон, который является фотоинициатором, в концентрации 789 мкг/кг. Дальнейшие исследования в этом направлении показали, что в злаковых хлопьях, произведенных также в Бельгии, были обнаружены 4-метил бензофенон и бензофенон в концентрациях 3729 мкг/кг и 4210 мкг/кг соответственно [38,39]. Исследования, подтвердившие токсикологические, канцерогенные и эндокринные эффекты фотоинициаторов, а также данные 2009 года об их присутствии в пищевых продуктах стимулировали многочисленные исследования миграции этих веществ в пищу. Так, в публикации [40] показано, что изопротилтиоксантон — один из фотоинициаторов — взаимодействует с липидами. В [41] показано *in vitro*, что изопротилтиоксантон проявляет антиэстрогенные и антиандрогенные свойства. Канцерогенные свойства бензофенона были продемонстрированы на самках и самцах крыс в ходе проведения работы [42]. Помимо канцерогенных свойств бензофенона, доказано, что он может быть причиной гипоспадии [43]. Работой [44] показано, что фотоинициаторы обладают высокой степенью абсорбции в желудочно-кишечном тракте с дальнейшим попаданием в плазму крови.

В работе [45] исследовали миграцию четырех фотоинициаторов (бензофенон, 4-метил бензофенон, 2-метил-4'-(метилтио)-2-морфолинопропиофенон и 2-этилгексил-4-(диметиламино)бензоат) в попкорн и пищевой имитатор Tenax®. Как это бывает в работах по изучению миграции в пищевой продукт веществ из полимерной упаковки, в данной работе сравнивали нагревание продукта в микроволновой печи (мощность 100, 440 и 600 Вт) и конвекционным способом (20, 40 и 60 °С). Согласно результатам, все из определяемых четырех фотоинициаторов были обнаружены как в пищевом имитаторе, так и в попкорне. Наибольшая доля во всех образцах приходилась на бензофенон, следующим по количеству был 4-метил бензофенон, затем 2-этилгексил-4-(диметиламино)бензоат и наименьшее количество во всех образцах пришлось на 2-метил-4'-(метилтио)-2-морфолинопропиофенон.

Учитывая способность фотоинициаторов мигрировать в пищевую продукцию, а также их токсикологические и канцерогенные свойства, в первую очередь необходимо научиться определять их в самой упаковке, что и было сделано авторами работы [46]. В ней авторы разработали методику определения восемнадцати фотоинициаторов с помощью ГХ–МС метода. Было разработано два способа подготовки проб: с использованием специального оборудования для подготовки проб FastPrep-24 и экстракция с помощью ультразвука. Сама методика позволяет обнаружить фотоинициаторы в упаковках с качественными и количественными пределами обнаружения от 0,060 до 0,614 мкг/кг и от 0,197 до 2,027 мкг/кг соответственно. Разработанную методику авторы применили к реальным образцам бумажной упаковки и установили, что некоторые аналиты отсутствовали в отдельных видах, а концентрация обнаруженных составляла от 1,29 до 194,75 мкг/кг.

3.6. Бисфенолы

Бисфенолы — одни из наиболее изученных контаминантов, которые могут мигрировать в пищевые продукты из пластиковой упаковки. Исследованиями, посвященными определению бисфенолов в пищевой продукции, занимаются ученые со всего мира. В данном направлении можно найти работы китайских, европейских, американских ученых, а также работы ученых из стран Ближнего Востока. Кроме того, большинство этих работ направлены на определение бисфенолов непосредственно в пищевой продукции, а не в упаковке, в отличие от других контаминантов, рассмотренных ранее.

Изучение вопроса контаминации пищевой продукции бисфенолами началось с бисфенола А (БФА). БФА широко использовался при производстве поликарбонатных материалов, эпоксидных смол и термобумаги. Из-за больших объемов производств материалов с применением БФА, а также соответствующих объемов дальнейшей утилизации этих материалов, БФА довольно сильно загрязнил окружающую среду [47]. Загрязнение окружающей среды БФА подтверждают исследования, согласно которым БФА был обнаружен в сыворотке крови человека, моче, пуповинной крови, амниотической жидкости и плацентарной ткани [48]. В работе [49] авторы связывают БФА из-за его эндокринно-разрушающей природы с такими заболеваниями, как диабет, ожирение, репродуктивные расстройства, сердечно-сосудистые заболевания, врожденные дефекты и рак молочной железы. В связи с неблагоприятным воздействием на организм человека, в Канаде, США, Китае и ЕС БФА был запрещен для использования при производстве материалов, которые могут в дальнейшем каким-либо способом контактировать с младенцами.

Для соблюдения запрета о применении БФА в производстве начали применять различные его аналоги. Наиболее часто применяемые из них: бисфенол Б (БФБ), бисфенол С (БФС), бисфенол Ф (БФФ) и бисфенол АФ (БФАФ). Широкое применение бисфенолов привело к загрязнению ими окружающей среды. В обзорной работе [50] приведена информация, что перечисленные аналоги БФА были обнаружены в продуктах питания и жидкостях человеческого организма. Также была отмечена их эстрогеноподобная активность аналогично с БФА. БФБ, БФС, БФФ и БФАФ были обнаружены, в частности, в речной [51] и морской водах [52], а также в отложениях в них [53], в грудном молоке женщин [54], в сыворотке крови и в моче людей разных возрастов [55,56]. Известно, что бисфенолы обнаруживали в мышечной ткани и печени океанических костных рыб, тем самым они потенциально представляют риск для человеческого здоровья. Учитывая это, бисфенолы можно назвать не только контаминантами пищевой продукции, а сильными загрязнителями окружающей среды.

В целом все бисфенолы обладают аналогичной токсичностью, как и БФА [50,57]: БФС и БФФ оказывают воздействие на тироидные гормоны [49], БФАФ проявил даже более высокую потенциальную токсичность, чем БФА, в клетках крови человека [58].

Как ранее было отмечено, бисфенолы — одни из наиболее изученных контаминантов пищевой продукции из упаковочных материалов. Подтверждает это большое количество работ, посвященных разработкам метода их определения в разнообразных пищевых продуктах, упаковочных материалах и т. п., и проведению мониторинговых исследований по вопросу их содержания в пищевой продукции.

Что касается методик их определения, практически все они основаны на методе ВЭЖХ–МС/МС (чуть реже используется метод ГХ–МС), как и все методики для определения контаминантов пищевой продукции экзогенного и эндогенного происхождения. Подготовка проб во всех работах предпочтительно используется с ТФЭ, но различных видов, среди которых твердофазная микроэкстракция, магнитная твердофазная экстракция, дисперсионная твердофазная экстракция, сорбционная экстракция с мешалкой и мембранная экстракция [59–61].

Для понимания масштабов проблемы контаминации пищевой продукции бисфенолами можно привести следующие работы:

[62] — исследования 168 наименований пищевой продукции Канады и Южной Африки, среди которых рыбное филе, куриная грудка, консервированный тунец, овощи, хлеб и сливочное масло. В ходе выполнения работы в исследованной пищевой продукции были обнаружены 11 бисфенолов, суммарная концентрация которых в рыбе составила до 23,3 мкг/кг, в овощах — до 0,17 мкг/кг, в куриной грудке — до 18,7 мкг/кг. Однако в хлебе, сливочном масле и консервированном тунце бисфенолы обнаружены не были;

[63] — исследовали 93 образца соков, реализуемых в Риате, Саудовская Аравия. Бисфенолы были обнаружены в 77 из 93 исследованных образцов в диапазоне концентраций от 0,14 до 28,97 мкг/л;

[64] — исследовали консервированные фрукты и овощи, среди которых ананасы, персики, личи, груши, манго, папайя, маракуйя, кукуруза, зеленая фасоль, горошек, грибы, соя, томаты, шпинат и морковь. Авторы обнаружили бисфенолы в 87% исследованных образцов в диапазоне концентраций от 0,3 до 265,6 мкг/кг;

[65] — были проведены исследования образцов безалкогольных напитков в жестяных банках и бутилированной воды, реализуемых в Индии. Бисфенолы были обнаружены во всех исследованных образцах в диапазонах концентраций 8,2–14,01 нг/л для безалкогольных напитков в жестяных банках и 60–90 нг/л в бутилированной воде. Сравнение результатов исследований [65] и [63], посвященных напиткам, выявляет тысячекратное расхождение в данных.

[66] — работа посвящена созданию способа экстракции бисфенолов, однако разработанный способ испытали на напитках «Кока-кола» и «Спрайт», реализуемых в Китае. Результаты показали содержание бисфенолов в этих напитках в концентрациях 92–94 мкг/л;

[67] — очередная работа китайских ученых (аналогично с [66]) была направлена на разработку методики определения бисфенолов. В ходе исследования изучались реальные образцы. Были проведены испытания блюд: курицы Кунг Пао, Мапо Тофу и рубленой свинины Ю-Шань по 4 образца каждого наименования. Результаты показали наличие бисфенолов А и С в каждом исследованном образце с концентрациями 0,72–19,37 мкг/кг и 0,10–26,99 мкг/кг соответственно. БФАФ был обнаружен только в 3 образцах курицы Кунг Пао, БФФ — в половине образцов, а БФБ не был найден ни в одном из образцов.

4. Заключение

Результаты анализа научной литературы продемонстрировали серьезную проблему контаминации пищевой продукции компонентами упаковочных материалов. Все рассмотренные работы показывают, что нет практически никакого упаковочного материала, который бы не «загрязнял» пищевую продукцию. Большая часть работ посвящена соединениям, которые переходят в пищевую упаковку из пластиковых упаковочных материалов. Однако есть существенное количество доказательств того, что и из других видов упаковки (например, из бумажной) в пищевую продукт могут мигрировать компоненты, оказывающие неблагоприятное воздействие на организм человека. Даже составляющие чернил для маркировки, которые теоретически никак не могут контактировать с пищевым продуктом, поскольку находятся на внешней стороне упаковки, могут попадать в пищевую продукт.

Публикационная активность в этом направлении показывает, что научное сообщество заинтересовалось данным вопросом относительно недавно — работ за последние 3–4 года больше, чем за предыдущие два десятилетия. Это в очередной раз показывает масшта-

бы изучаемой проблемы и подчеркивает необходимость проведения исследований в этой области. Многочисленные исследования показывают, что миграция контаминантов из упаковки в продукты питания, как правило, невелика и часто значительно ниже установленных предельно допустимых концентраций (ПДК). Это говорит о том, что воздействие таких веществ на организм человека, как правило, незначительно. Однако важно помнить, что пищевые продукты — не единственный источник веществ, присутствующих в упаковочных (и других) материалах, особенно в пластиковых. Кроме того, важно понимать, что большинство соединений, обладающих канцерогенными свойствами, зачастую обладают синергетическим эффектом — один канцероген, попадая в организм, усиливает канцерогенные свойства других.

Необходимость исследования контаминации пищевого продукта веществами из упаковочных материалов показывает и пример с диоксидом титана — еще 15 лет назад его считали безопасным для человека и широко использовали, а в настоящее время он запрещен к применению в пищевой промышленности в некоторых странах из-за его канцерогенных и генотоксических свойств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

- Ibrahim, Yu. S., Anuar, S. T., Azmi, A. A., Khalik, W. M. A. W. M., Lehata, S., Hamzah, S. R. et al. (2021). Detection of microplastics in human colectomy specimens. *JGH Open*, 5(1), 116–121. <https://doi.org/10.1002/jgh.5.12457>
- Hu, C. J., Garcia, M. A., Nihart, A., Liu, R., Yin, L., Adolph, N. et al. (2024). Microplastic presence in dog and human testis and its potential association with sperm count and weights of testis and epididymis. *Toxicological Sciences*, 200(2), 235–240. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfae060>
- Qin, X., Cao, M., Peng, T., Shan, H., Lian, W., Yu, Y. et al. (2024). Features, potential invasion pathways, and reproductive health risks of microplastics detected in human uterus. *Environmental Science and Technology*, 58(24), 10482–10493. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c01541>
- Ragusa, A., Svelato, A., Santacroce, C., Catalano, P., Notarstefano, V., Carnevali, O. et al. (2021). Plastics: First evidence of microplastics in human placenta. *Environment International*, 146, Article 106274. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>
- Amato-Lourenço, L. F., Carvalho-Oliveira, R., Ribeiro Júnior, G., Galvão, L. dos S., Ando, R. A., Mauad, T. (2021). Presence of airborne microplastics in human lung tissue. *Journal of Hazardous Materials*. 416, Article 126124. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126124>
- Yang, Q., Peng, Y., Wu, X., Cao, X., Zhang, P., Liang, Z. et al. (2025). Microplastics in human skeletal tissues: Presence, distribution and health implications. *Environment International*, 196, Article 19316. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2025.109316>
- Zhan, W., Rhim, J.-W. (2022). Titanium dioxide (TiO₂) for the manufacture of multifunctional active food packaging films. *Food Packaging and Shelf Life*, 31, Article 100806. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100806>
- Bampidis, V., Azimonti, G., Bastos, M. de L., Christensen, H., Dusemund, B., Durjava, M. F. et al. (2021). Safety and efficacy of a feed additive consisting of titanium dioxide for all animal species (Kronos International, Inc.). *EFSA Journal*, 19(6), Article e06630. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2021.6630>
- Naves, M. P. C., de Moraes, C. R., Silva, A. C. A., Dantas, N. O., Spanó, M. A., de Rezende, A. A. (2018). Assessment of mutagenic, recombinogenic and carcinogenic potential of titanium dioxide nanocrystals in somatic cells of *Drosophila melanogaster*. *Food and Chemical Toxicology*, 112, 273–281. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2017.12.040>
- Shi, J., Han, S., Zhang, J., Liu, Y., Chen, Z., Jia, G. (2022). Advances in genotoxicity of titanium dioxide nanoparticles *in vivo* and *in vitro*. *NanoImpact*, 25, Article 100377. <https://doi.org/10.1016/j.nimpact.2021.100377>
- Wu, Y., Chen, L., Chen, F., Zou, H., Wang, Z. (2020). A key moment for TiO₂: Prenatal exposure to TiO₂ nanoparticles may inhibit the development of offspring. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 202, Article 110911. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110911>
- El Yamani, N., Rubio, L., García-Rodríguez, A., Kažimírová, A., Rundén-Pran, E., Magdalena, B. et al. (2022). Lack of mutagenicity of TiO₂ nanoparticles *in vitro* despite cellular and nuclear uptake. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 882, Article 503545. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2022.503545>
- Bastardo-Fernández, I., Chekri, R., Oster, C., Thoury, V., Fiscicaro, P., Jitaru, P. et al. (2024). Assessment of TiO₂ (nano)particles migration from food packaging materials to food simulants by single particle ICP-MS/MS using a high efficiency sample introduction system. *NanoImpact*, 34, Article 100503. <https://doi.org/10.1016/j.nimpact.2024.100503>
- Yang, Ch., Zhu, B., Wang, J., Qin, Yu. (2019). Structural changes and nano-TiO₂ migration of poly(lactic acid)-based food packaging film contacting with ethanol as food simulant. *International Journal of Biological Macromolecules*, 139, 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.07.151>
- Bertoldi, C., Pena, A. de C. C., Dallegrave, A., Fernandes, A. N., Gutterres, M. (2020). Photodegradation of emerging contaminant 2-(thiocyanomethylthio) benzothiazole (TCMTB) in aqueous solution: Kinetics and transformation products. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 105(3), 443–439. <https://doi.org/10.1007/s00128-020-02954-2>
- Hansen, A., Brans, R., Sonsmann, F. (2021). Allergic contact dermatitis to rubber accelerators in protective gloves: Problems, challenges and solutions for occupational skin protection. *Allergologie Select*, 5, 335–344. <https://doi.org/10.5414/ALX02265E>
- Gao, W., Cheng, Y., Ni, Y., Wu, A., Song, S., Kuang, H. et al. (2024). Immunochromatographic assay for detection (2-benzothiazolylthio) methyl thiocyanate in food packaging paper materials. *Food Bioscience*, 60, Article 104260. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104260>
- Glenn, G., Shogren, R., Jin, X., Orts, W., Hart-Cooper, W., Olson, L. (2021). Per- and polyfluoroalkyl substances and their alternatives in paper food packaging. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(5), 2596–2625. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12726>
- Carnero, A. R., Lestido-Cardama, A., Loureiro, P. V., Barbosa-Pereira, L., de Quirós, A. R. B., Sendón, R. (2021). Presence of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in food contact materials (FCM) and its migration to food. *Foods*, 10(7), Article 1443. <https://doi.org/10.3390/foods10071443>
- Hepburn, E., Madden, C., Szabo, D., Coggan, T. L., Clarke, B., Currell, M. (2019). Contamination of groundwater with per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) from legacy landfills in an urban re-development precinct. *Environmental Pollution*, 248, 101–115. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.02.018>
- Ateia, M., Maroli, A., Tharayil, N., Karanfil, T. (2019). The overlooked short- and ultrashort-chain poly- and perfluorinated substances: A review. *Chemosphere*, 220, 866–882. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.12.186>
- Schaidler, L. A., Balan, S. A., Blum, A., Andrews, D. Q., Strynar, M. J., Dickinson, M. E. et al. (2017). Fluorinated compounds in U. S. Fast food packaging. *Environmental Science and Technology Letters*, 4(3), 105–111. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.6b00435>
- Barry, V., Winquist, A., Steenland, K. (2013). Perfluorooctanoic acid (PFOA) exposures and incident cancers among adults living near a chemical plant. *Environmental Health Perspectives*, 121(11–12), 1313–1318. <https://doi.org/10.1289/EHP.1306615>
- Dueñas-Mas, M. J., Ballesteros-Gómez, A., de Boer, J. (2023). Determination of several PFAS groups in food packaging material from fast-food restaurants in France. *Chemosphere*, 339, Article 139734. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139734>
- Alin, J., Hakkarainen, M. (2010). Type of polypropylene material significantly influences the migration of antioxidants from polymer packaging to food simulants during microwave heating. *Journal of Applied Polymer Science*, 118(2), 1084–1093. <https://doi.org/10.1002/app.32472>
- Díaz-Galiano, F. J., Gómez-Ramos, M. J., Beraza, I., Murcia-Morales, M., Fernández-Alba, A. R. (2023). Cooking food in microwavable plastic containers: *In situ* formation of a new chemical substance and increased migration of polypropylene polymers. *Food Chemistry*, 417, Article 135852. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135852>
- Bauer, A., Jesús, F., Ramos, M.J.G., Lozano, A., Fernández-Alba, A. R. (2019). Identification of unexpected chemical contaminants in baby food coming from plastic packaging migration by high resolution accurate mass spectrometry. *Food Chemistry*, 295, 274–288. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.05.105>
- Fang, H., Wang, J., Lynch, R. A. (2017). Migration of di(2-ethylhexyl)phthalate (DEHP) and di-nbutylphthalate (DBP) from polypropylene food containers. *Food Control*, 73(Part B), 1298–1302. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.10.050>
- Lau, O.-W., Wong, S.-K. (2000). Contamination in food from packaging material. *Journal of Chromatography A*, 882(1–2), 255–270. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(00\)00356-5](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(00)00356-5)
- Duty, S. M., Calafat, A. M., Silva, M. J., Ryan, L., Hauser, R. (2005). Phthalate exposure and reproductive hormones in adult men. *Human Reproduction*, 20(3), 604–610. <https://doi.org/10.1093/humrep/deh566>
- Latini, G., Del Vecchio, A., Massaro, M., Verrotti, A., De Felice, C. (2006). Phthalate exposure and male infertility. *Toxicology*, 226(2–3), 90–98. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2006.07.011>
- Singh, S., Li, S. S.-L. (2011). Phthalates: Toxicogenomics and inferred human diseases. *Genomics*, 97(3), 148–157. <https://doi.org/10.1016/j.ygeno.2010.11.008>
- Heudorf, U., Mersch-Sundermann, V., Angerer, J. (2007). Phthalates: Toxicology and exposure. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 210(5), 623–634. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2007.07.011>

34. Wang, Y., Qian, H. (2021). Phthalates and their impacts on human health. *Healthcare*, 9(5), Article 603. <https://doi.org/10.3390/healthcare9050603>
35. Pack, E. C., Lee, K. Y., Jung, J. S., Jang, D. Y., Kim, H. S., Koo, Y. L. et al. (2021). Determination of the migration of plastic additives and non-intentionally added substances into food simulants and the assessment of health risks from convenience food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 30, Article 100736. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100736>
36. Alin, J., Hakkarainen, M. (2013). Combined chromatographic and mass spectrometric toolbox for fingerprinting migration from PET tray during microwave heating. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(6), 1405–1415. <https://doi.org/10.1021/jf3047847>
37. Aznar, M., Domeño, C., Osorio, J., Nerin, C. (2020). Release of volatile compounds from cooking plastic bags under different heating sources. *Food Packaging and Shelf Life*, 26, Article 100552. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100552>
38. SCICOM. (2009). Migration de 4-méthylbenzophénone de l'emballage en carton imprimé vers les céréales de petit déjeuner (dossier 2009/05) Conseil urgent validé par le Comité scientifique le 16/02/2009 Retrieved from https://scicom.favv-afscs.be/comitescientifique/avis/2009/_documents/CONSEILurgent_05-2009_FR_DOSSIER2009-05.pdf Accessed September 12, 2024.
39. UN System Chief Executives Board for Coordination. High-Level Committee on Management. Human Resources Network (2009). Conclusions of the meeting of the Human Resources Network, 17th session (UNWTO, Madrid, 4–6 March 2009): Chief Executives Board for Coordination. Retrieved from <https://digitallibrary.un.org/record/3921446?view=pdf> Accessed September 12, 2024.
40. Momo, F., Fabris, S., Stevanato, R. (2007). Interaction of isopropylthioxanthone with phospholipid liposomes. *Biophysical Chemistry*, 127(1–2), 36–40. <https://doi.org/10.1016/j.bpc.2006.12.002>
41. Peijnenburg, A., Riethof-Poortman, J., Bayku, H., Portier, L., Bovee, T., Hoogenboom R. (2010). AhR-agonistic, anti-androgenic, and anti-estrogenic potencies of 2-isopropylthioxanthone (ITX) as determined by *in vitro* bioassays and gene expression profiling. *Toxicology in Vitro*, 24(6), 1619–1628. <https://doi.org/10.1016/j.tiv.2010.06.004>
42. Rhodes, M. C., Bucher, J. R., Peckham, J. C., Kissling, G. E., Hejtmancik, M. R., Chhabra, R. S. (2007). Carcinogenesis studies of benzophenone in rats and mice. *Food and Chemical Toxicology*, 45(5), 843–851. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2006.11.003>
43. Hsieh, M. H., Grantham, E. C., Liu, B., Macapagal, R., Willingham, E., Baskin, L. S. (2007). *In utero* exposure to benzophenone-2 causes hypospadias through an estrogen receptor dependent mechanism. *Journal of Urology*, 178(4S), 1637–1642. <https://doi.org/10.1016/j.juro.2007.03.190>
44. Jeon, H.-K., Sarma, S.N., Kim, Y.-J., Ryu, J.-C. (2008). Toxicokinetics and metabolisms of benzophenone-type UV filters in rats. *Toxicology*, 248(2–3), 89–95. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2008.02.009>
45. Ji, S., Zhang, J., Tao, G., Peng, C., Sun, Y., Hou, R. et al. (2019). Influence of heating source on the migration of photoinitiators from packaging materials into Tenax® and popcorn. *Food Packaging and Shelf Life*, 21, Article 100340. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100340>
46. Liang, Q., Wang, Z., Du, W., Liu, W., Cao, J., Ren, J. et al. (2022). Determination of 18 photoinitiators in food paper packaging materials by FastPrep-based extraction combined with GC–MS. *Food Chemistry*, 377, Article 131980. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131980>
47. Abril, C., Santos, J. L., Martin, J., Aparicio, I., Alonso, E. (2020). Occurrence, fate and environmental risk of anionic surfactants, bisphenol A, perfluorinated compounds and personal care products in sludge stabilization treatments. *Science of the Total Environment*, 711, Article 135048. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135048>
48. Macczak, A., Cyrkler, M., Bukowska, B., Michalowicz, J. (2017). Bisphenol A, bisphenol S, bisphenol F and bisphenol AF induce different oxidative stress and damage in human red blood cells (*in vitro* study). *Toxicology in Vitro*, 41, 143–149. <https://doi.org/10.1016/j.tiv.2017.02.018>
49. Zhang, Y.-F., Ren, X.-M., Li, Y.-Y., Yao, X.-F., Li, C.-H., Qin, Z.-F. et al. (2018). Bisphenol A alternatives bisphenol S and bisphenol F interfere with thyroid hormone signaling pathway *in vitro* and *in vivo*. *Environmental Pollution*, 237, 1072–1079. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.027>
50. Chen, D., Kannan, K., Tan, H., Zheng, Z., Feng, Y.-L., Wu, Y. et al. (2016). Bisphenol analogues other than BPA: Environmental occurrence, human exposure, and toxicity—A review. *Environmental Science and Technology*, 50(11), 5438–5453. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05387>
51. Huang, Z., Zhao, J.-L., Yang, Y.-Y., Jia, Y.-W., Zhang, Q.-Q., Chen, C.-E. et al. (2020). Occurrence, mass loads and risks of bisphenol analogues in the Pearl River Delta region, South China: Urban rainfall runoff as a potential source for receiving rivers. *Environmental Pollution*, 263(Part B), Article 114361. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114361>
52. Yan, Z., Liu, Y., Yan, K., Wu, S., Han, Z., Guo, R. et al. (2017). Bisphenol analogues in surface water and sediment from the shallow Chinese freshwater lakes: Occurrence, distribution, source apportionment, and ecological and human health risk. *Chemosphere*, 184, 318–328. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.010>
53. Zhao, X., Qiu, W., Zheng, Y., Xiong, J., Gao, C., Hu, S. (2019). Occurrence, distribution, bioaccumulation, and ecological risk of bisphenol analogues, parabens and their metabolites in the Pearl River Estuary, South China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 180, 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.04.083>
54. Jin, H., Xie, J., Mao, L., Zhao, M., Bai, X., Wen, J. et al. (2020). Bisphenol analogue concentrations in human breast milk and their associations with post-natal infant growth. *Environmental Pollution*, 259, Article 113779. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113779>
55. Li, A., Zhuang, T., Shi, W., Liang, Y., Liao, C., Song, M. et al. (2020). Serum concentration of bisphenol analogues in pregnant women in China. *Science of The Total Environment*, 707, Article 136100. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136100>
56. Mendy, A., Salo, P. M., Wilkerson, J., Feinstein, L., Ferguson, K. K., Fessler, M. B. et al. (2020). Association of urinary levels of bisphenols F and S used as bisphenol A substitutes with asthma and hay fever outcomes. *Environmental Pollution*, 183, Article 108944. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108944>
57. Cano-Nicolau, J., Valliant, C., Pellegrini, E., Charlier, T. D., Kah, O., Coumilleau, P. (2016). Estrogenic effects of several BPA analogs in the developing zebrafish brain. *Frontiers in Neuroscience*, 10, Article 112. <https://doi.org/10.3389/fnins.2016.00112>
58. Mokra, K., Kuźmińska-Surowaniec, A., Woźniak, K., Michałowicz, J. (2017). Evaluation of DNA-damaging potential of bisphenol A and its selected analogs in human peripheral blood mononuclear cells (*in vitro* study). *Food and Chemical Toxicology*, 100, 62–69. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2016.12.003>
59. Ali, N. F. M., Sajid, M., Abd Halim, W. I. T., Mohamed, A. H., Zain, N. N. M., Kamaruzaman, S. et al. (2023). Recent advances in solid phase extraction methods for the determination of bisphenol A and its analogues in environmental matrices: An updated review. *Microchemical Journal*, 184(Part A), Article 108158. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2022.108158>
60. Yang, C., Wang, Y., Dong, P. Z., Li, Y., Pang, Y.-H. (2024). Determination of bisphenols in food and its contact materials migration by magnetic solid-phase extraction coupled with LC–MS/MS. *Food Bioscience*, 59, Article 104179. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104179>
61. Guan, S., Wu, H., Yang, L., Wang, Z., Wu, J. (2020). Use of a magnetic covalent organic framework material with a large specific surface area as an effective adsorbent for the extraction and determination of six fluoroquinolone antibiotics by HPLC in milk sample. *Journal of Separation Science*, 43(19), 3775–3784. <https://doi.org/10.1002/jssc.202000616>
62. Tian, L., Zheng J., Pineda, M., Yargeau, V., Furlong, D., Chevrier J. et al. (2022). Targeted screening of 11 bisphenols and 7 plasticizers in food composites from Canada and South Africa. *Food Chemistry*, 385, Article 132675. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132675>
63. Khan, M. R., Ouladsmame, M., Alammar, A. M., Azam, M. (2021). Bisphenol A leaches from packaging to fruit juice commercially available in markets. *Food Packaging and Shelf Life*, 28, Article 100678. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100678>
64. Cunha, S. C., Fernandes, J. O. (2013). Assessment of bisphenol A and bisphenol B in canned vegetables and fruits by gas chromatography – mass spectrometry after QuEChERS and dispersive liquid–liquid microextraction. *Food Control*, 33(2), 549–555. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.03.028>
65. Kumar, A., Singh, D., Bhandari, R., Malik, A. K., Kaur, S., Singh, B. (2023). Bisphenol A in canned soft drinks, plastic-bottled water, and household water tank from Punjab, India. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 9, Article 100205. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100205>
66. Wang, Qi., Kaur, Y., Wu, Y., Li, S., Bai, H., Zhou, Q. (2023). β -Cyclodextrin functionalized magnetic polyamine-amine dendrimers for high enrichment and effective analysis of trace bisphenolic pollutants in beverages. *Chemosphere*, 328, Article 138537. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138537>
67. Yao, K., Zhang, J., Niu, Y., Zhang, X., Yang, Y., Wu, Y. et al. (2023). Multi-immuno-affinity column for the simultaneous analysis of bisphenol A and its analogues in Chinese foods by liquid chromatography tandem mass spectrometry. *Food Chemistry*, 422, Article 136295. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136295>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
Утьянов Дмитрий Александрович — кандидат технических наук, научный сотрудник, лаборатория «Научно-методические работы, биологические и аналитические исследования», Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, Москва, ул. Талалихина, 26 Тел.: +7-495-676-79-61 E-mail: d.utyanov@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7693-3032 * автор для контактов	Dmitry A. Utyanov , Candidate of Technical Sciences, Scientific Worker, Laboratory of Scientific and Methodical Work, Biological and Analytical Research, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhina str., 109316, Moscow, Russia Tel.: +7-495-676-79-61 E-mail: d.utyanov@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7693-3032 * corresponding author
Вострикова Наталья Леонидовна — доктор технических наук, Руководитель Научно-исследовательского испытательного центра. Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, Москва, ул. Талалихина, 26 Тел.: +7-495-676-79-61 E-mail: n.vostrikova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9395-705X	Natalia L. Vostrikova , Doctor of Technical Sciences, Head of the Research Testing Center, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhina str., 109316, Moscow, Russia. Tel.: +7495-676-95-11, E-mail: n.vostrikova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9395-705X
Василевская Екатерина Романовна — кандидат технических наук, научный сотрудник, Экспериментальная клиника-лаборатория биологически активных веществ животного происхождения, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, Москва, ул. Талалихина, 26 Тел.: +7-495-676-79-61 E-mail: e.vasilevskaya@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4752-3939	Ekaterina R. Vasilevskaya , Candidate of Technical Sciences, Scientific Worker, Experimental Clinic-Laboratory of Biologically Active Substances of Animal Origin, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhina str., 109316, Moscow, Russia Tel.: +7-495-676-79-61 E-mail: e.vasilevskaya@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4752-3939 ;
Куликовский Андрей Владимирович — кандидат технических наук, заведующий лабораторией «Научно-методические работы, биологические и аналитические исследования», Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, Москва, ул. Талалихина, 26 Тел.: +7-495-676-79-81 E-mail: a.kulikovskii@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9140-5390	Andrey V. Kulikovskii , Candidate of Technical Sciences, Head of Laboratory of Scientific and Methodical Work, Biological and Analytical Research, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhina str., 109316, Moscow, Russia Tel.: +7-495-676-60-11 E-mail: a.kulikovskii@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9140-5390
Карабанов Сергей Юрьевич — кандидат ветеринарных наук, научный сотрудник, Экспериментальная клиника-лаборатория биологически активных веществ животного происхождения, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, Москва, ул. Талалихина, 26 Тел.: +7-495-676-79-81 E-mail: s.karabanov@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1688-4045	Sergey Yu. Karabanov , Candidate of Vet. Sciences, Scientific Worker, Experimental Clinic-Laboratory of Biologically Active Substances of Animal Origin, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhina str., 109316, Moscow, Russia Tel.: +7-495-676-79-61 E-mail: s.karabanov@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1688-4045
Критерии авторства	Contribution
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	The author has the sole responsibility for writing the manuscript and is responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	Conflict of interest
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.