

УДК 614.31

Научный обзор



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-400-11-167-186

А.А. Лукин^{1,2} ✉О.П. Кан³¹Южно-Уральский государственный аграрный университет, Троицк, Челябинская обл., Россия²Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия³Университет Сивас Джумхуриет, Сивас, Турция

✉ lukin3415@gmail.com

Поступила в редакцию: 01.10.2025

Одобрена после рецензирования: 13.10.2025

Принята к публикации: 28.10.2025

© Лукин А.А., Кан О.П.

Методы определения полициклических ароматических углеводородов в молоке и молочных продуктах

РЕЗЮМЕ

Научный обзор посвящен методам определения полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в молоке и молочных продуктах. Основное внимание уделено точности, надежности и доступности используемых методик, обеспечивающих контроль качества пищевых продуктов. Рассматриваются разнообразные техники анализа, включая жидкостную и газовую хроматографию, спектроскопию и микрофлуоресценцию. Отмечается, что существующие технологии обеспечивают достаточную точность и воспроизводимость результатов, способствуя повышению безопасности молочных продуктов. Несмотря на сложность процедур, современная техника обеспечивает надежные результаты и способствует контролю качества продуктов питания. ПАУ классифицируются по молекулярной массе и происхождению, различаются по уровню токсичности и способности накапливаться в живых организмах. Подробно рассматриваются методы экстракции и очистки, включая жидкостную и газовую хроматографию, рамановскую микроскопию и инфракрасную спектроскопию. Приводятся международные рекомендации и ограничения на содержание ПАУ в пищевых продуктах, установленные Агентством по охране окружающей среды США и Европейским агентством по безопасности пищевых продуктов. Оцениваются перспективы использования различных методов анализа в реальных условиях, подчеркивая важность точного контроля содержания ПАУ в молочных продуктах. Научный обзор подчеркивает необходимость дальнейшего совершенствования методов анализа и контроля ПАУ, а также важность сотрудничества между молочной промышленностью и профессиональными лабораториями для минимизации риска загрязнений.

Ключевые слова: молоко, молочные продукты, полициклические ароматические углеводороды, окружающая среда, загрязнители, безопасность, токсичность

Для цитирования: Лукин А.А., Кан О.П. Методы определения полициклических ароматических углеводородов в молоке и молочных продуктах. *Аграрная наука*. 2025; 400(11): 167–186.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-167-186>

Review



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-400-11-167-186

Aleksander A. Lukin^{1,2} ✉Özlem Pelin Can³¹South Ural State Agrarian University, Troitsk, Chelyabinsk region, Russia²South Ural State University, Chelyabinsk, Russia³Sivas Cumhuriyet University, Sivas, Türkiye

✉ lukin3415@gmail.com

Received by the editorial office: 01.10.2025

Accepted in revised: 13.10.2025

Accepted for publication: 28.10.2025

© © Lukin A.A., Can Ö.P.

Methods for determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in milk and dairy products

ABSTRACT

This scientific review is dedicated to analytical methods for the determination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in milk and dairy products. The primary focus is placed on the accuracy, reliability, and accessibility of the methodologies employed for food quality control. A comprehensive examination of various analytical techniques is provided, including liquid and gas chromatography, spectroscopy, and micro-fluorescence. It is noted that existing technologies ensure sufficient accuracy and reproducibility of results, thereby enhancing the safety of dairy products. Despite the complexity of the procedures, modern instrumentation delivers reliable outcomes and supports effective food quality control. PAHs are classified based on their molecular weight and origin, differing in their toxicity levels and capacity for bioaccumulation in living organisms. The review offers a detailed assessment of extraction and purification methods, encompassing liquid and gas chromatography, Raman microscopy, and infrared spectroscopy. International guidelines and regulatory limits for PAH content in foodstuffs, as established by the US Environmental Protection Agency (EPA) and the European Food Safety Authority (EFSA), are presented. The prospects for the application of various analytical methods in real-world settings are evaluated, emphasizing the critical importance of precise monitoring of PAH levels in dairy products. This review underscores the necessity for the continued refinement of PAH analysis and control methods, as well as the significance of collaboration between the dairy industry and specialized laboratories to minimize contamination risks.

Key words: milk, dairy products, polycyclic aromatic hydrocarbons, environment, pollutants, safety, toxicity

For citation: Lukin A.A., Can Ö.P. Methods for determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in milk and dairy products. *Agrarian science*. 2025; 400(11): 167–186 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-167-186>

Введение/Introduction

Многочисленные исследования подтвердили положительное влияние коровьего молока на здоровье [1–4], особенно в детском возрасте, когда активно формируется костная система [5, 6]. Кальций и фосфор, содержащиеся в молоке [7], играют важную роль в профилактике остеопороза у пожилых людей [8, 9]. Кроме того, регулярное потребление молока и молочных продуктов может помочь уменьшить слабость и саркопению в этой возрастной группе. Молочные продукты богаты биоактивными пептидами, которые высвобождаются в процессе пищеварения и ферментации, что может принести дополнительные преимущества для здоровья [10, 11].

Молочный жир служит носителем жирорастворимых витаминов (A, D, E и K), значительно увеличивает калорийность (9 ккал/г жира) [12–14] и содержит незаменимые жирные кислоты, такие как конъюгированная линолевая кислота (CLA).

Молоко является ценным источником водорастворимых витаминов, таких как B_1 , B_2 , B_{12} , A и пантотеновая кислота, в количествах, которые делают его отличным диетическим выбором для удовлетворения значительной части ежедневных потребностей в питательных веществах [15].

Молоко других животных, таких как верблюды, яки, козы и овцы, обладает полезными свойствами для здоровья человека, и в некоторых регионах его популярность даже превышает популярность коровьего молока [16–19]. Например, козье и верблюжье молоко часто используется в диетической терапии для детей с аллергией на белки коровьего молока [20].

Люди начали употреблять молоко различных видов животных более 8000 лет назад, что сделало его важным источником питания на протяжении всей жизни. Коровье молоко, наиболее распространенное и производимое в промышленных масштабах [21], остается основным продуктом питания [22, 23], несмотря на продолжающиеся споры о его пользе. Многочисленные исследования подтверждают его значительные преимущества для здоровья [24–28].

В 2023–2024 годах мировое производство молока достигло 659,25 млн т и, по прогнозам, выросло на 1% до 667,49 млн т в 2024–2025 гг. [29]. Среднегодовой темп роста за последние 10 лет составил 2%. Индия является крупнейшим производителем с объемом производства, превышающим 200 млн т в 2024 году, за ней следуют Европейский союз (почти 150 млн т) и США (чуть более 100 млн т). Во многих регионах, молоко является основой рациона благодаря содержащимся в нем легкоусвояемым белкам и липидам [30–34].

С ростом рынка молочных продуктов увеличиваются и опасения по поводу загрязнения

окружающей среды, последствий переработки, а также наличия вредных веществ в молоке и молочных изделиях [35–39]. К таким веществам относятся ПАУ, которые классифицируются как мутагенные и канцерогенные. Контроль уровня ПАУ в молоке и молочных продуктах является крайне важным. Эти соединения накапливаются в окружающей среде и попадают в молоко через загрязненные корма. Кроме того, высокотемпературная обработка молока может способствовать дополнительному образованию ПАУ.

С учетом широкого потребления ПАУ у уязвимых групп, таких как дети и пожилые люди, контроль этих веществ в молоке становится крайне важным. Обнаружение ПАУ, как в качественном, так и в количественном измерении представляет собой сложную задачу, требующую разработки более эффективных и быстрых методов. Современные методы обнаружения позволят более точно контролировать уровни ПАУ на всех этапах производственного процесса [40–44].

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Поиск литературы проводили без ограничений по дате публикации исследования, типу публикации или языку статьи, хотя большинство поисковых терминов вводили на английском и русском языках.

Обзор составлен в основном на публикациях зарубежных авторов, анализ научных публикаций охватывает период с 2001 по 2025 год включительно.

Поиск потенциально релевантных статей проводили по ключевым словам в электронных базах данных Scopus¹, Sci-Hub² и e.Library.Ru³ и поисковой системы Google Академия⁴.

При выборе статей для обзора приоритет отдавали источникам с большим количеством цитирования. Были изучены списки литературы отобранных публикаций для выявления дополнительных релевантных источников информации.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Молоко представляет собой сложную матрицу. Гидрофобные ПАУ имеют склонность накапливаться в жирах, особенно в мембранах мицелл казеина, что усложняет их извлечение для анализа по сравнению с другими пищевыми матрицами. Аналитические методы определения ПАУ, как правило, основаны на хроматографии и требуют тщательной очистки образцов, чтобы избежать искажения результатов. Процесс очистки может включать традиционную экстракцию «жидкость — жидкость» или более современные методы, такие как твердофазная экстракция. Наиболее

¹ <https://sci-hub.ru/>

² <https://sci-hub.ru/>

³ <https://elibrary.ru/>

⁴ <https://scholar.google.com/?hl=ru>

распространенными методами являются жидкостная хроматография (рис. 1) с флуоресцентным детектором и газовая хроматография (рис. 2) с масс-спектрометрией.

ПАУ являются загрязнителями окружающей среды и широко распространены в природе (табл. 1). Они образуются в результате неполного сгорания органических веществ, поступая в окружающую среду двумя основными путями: через естественные процессы, такие как вулканические извержения, лесные пожары и биологическая активность (классифицируемая как пирогенная или петрогенная), а также в результате антропогенной деятельности, включая производство энергии, сельское хозяйство и промышленную переработку.

В научной литературе эти вещества также называют полициклическими органическими веществами (ПОМ), многоядерными ароматическими углеводородами (ПАУ), многоядерными ароматическими соединениями (ПНАС) или многоядерными углеводородами. Выявлены более 200 различных соединений, из которых более дюжины были отнесены Европейским союзом и США к категории веществ, требующих особого внимания из-за их токсичности. Эти соединения редко встречаются в природе в чистом виде. Чаще они образуют сложные смеси [45–48].

Некоторые ПАУ, такие как бензо[а]антрацен, хризен, бензо[б]флуорантен и бензо[а]пирен, используются в качестве маркерных соединений в тестах для оценки уровней загрязнения в образцах [49].

Структурно ПАУ состоят из двух или более связанных ароматических колец, состоящих из атомов углерода и водорода. Их можно классифицировать по различным критериям, включая молекулярный вес: ПАУ с низкой молекулярной

массой (LMW-ПАУ) содержат два или три ароматических кольца, тогда как ПАУ с высокой молекулярной массой (HMW-ПАУ) имеют четыре или более колец. Кроме того, ПАУ делятся на альтернантные (состоящие исключительно из шестиуглеродных бензольных колец) и неальтернантные (включающие шестиуглеродные бензольные кольца, соединенные с кольцами, содержащими менее шести атомов углерода) [50].

Существует стандартная классификация ПАУ, основанная на их происхождении, которая делит их на петрогенные и пирогенные. Первая категория связана с нефтяной промышленностью и другими нефтепродуктами. ПАУ, образующиеся из нефти, имеют низкую молекулярную массу и содержат два или три кольца. Вторая категория возникает в результате неполного сгорания. При сгорании тепло расщепляет органические молекулы,

Рис. 1. Схема жидкостной хроматографии

Fig. 1. Liquid chromatography diagram



Рис. 2. Схема газовой хроматографии

Fig. 2. Gas chromatography diagram

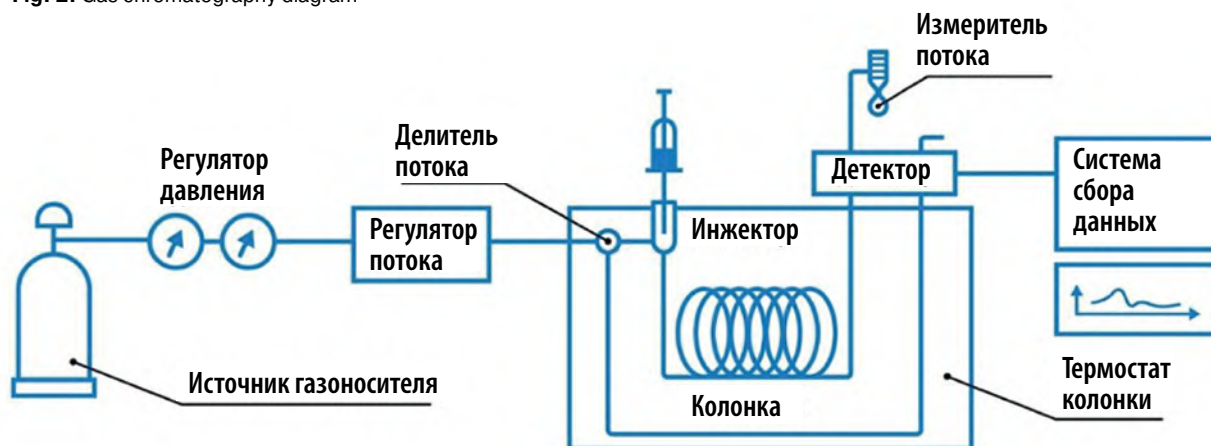
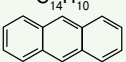
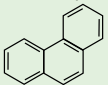
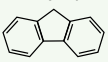
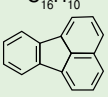
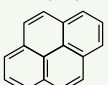
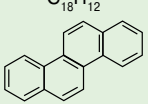
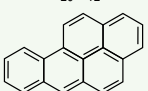
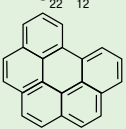
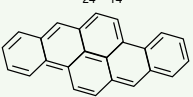
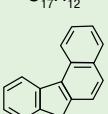


Таблица 1. Характеристики некоторых ПАУ

Table 1. Characteristics of some PAHs

ПАУ	Химическая формула	Влияние на здоровье человека и живых организмов
Нафталин (бицикло-[4.4.0]-дека-1,3,5,7,9-пентаен, гексален, антимит)	$C_{10}H_8$ 	Международное агентство по изучению рака (IARC) классифицировало нафталин как возможный канцероген людей и животных (Group 2B). В человеческом организме чаще всего концентрируется в жировой ткани, где может накапливаться до тех пор, пока жировая ткань не начнет сжигаться и данное вещество (нафталин) не попадет в кровь, после чего наступает отравление организма (кровотечение, возникновение опухолей и т. д.).
Аценафтилен (трицикло-[6.3.1.0 ^{4,12}]-додека-1(12), 2,4,6,8,10-гексаен)	$C_{12}H_8$ 	По степени токсичности соответствует нафталину.
Антрацен (трицикло-[8.4.0.0 ^{3,8}]-тетрадека-1,3,5,7,9,11,13-гептаен)	$C_{14}H_{10}$ 	IARC относит антрацен к группе 2B, возможно, канцерогенным для человека.
Фенантрен (трицикло-[8.4.0.0 ^{2,7}]-тетрадека-1,3,5,7,9,11,13-гептаен)	$C_{14}H_{10}$ 	Фенантрен, содержащийся в сигаретном дыме, может разрушать ДНК после попадания в кровь. По степени токсичности соответствует нафталину.
Флуорен (о,о'-дифениленметан, трицикло-[7.4.0.0 ^{2,7}]-тридека-2,4,6,9,11,13-гексаен)	$C_{13}H_{10}$ 	Исследования показали, что высокие дозы флуорена значительно замедляют рост <i>E. fetida</i> (дождевые черви), что приводит к нарушениям нормального развития. Кроме того, воздействие флуорена вызывало аномальную экспрессию мРНК, связанной с окислительным стрессом (например, металлотионеин и белок теплового шока 70), а также с процессами роста (контролируемыми на уровне трансляции опухолевым белком) и размножения (предшественником аннотацина) у <i>E. Fetida</i> .
Флуорантен (бензофлуорен, тетрацикло-[7.6.1.0 ^{5,10} .16.0 ^{10,15}]-гексадека-1,3,5,7,9(16),10,12,14-октаен)	$C_{16}H_{10}$ 	Флуорантен был классифицирован IARC как канцероген группы 3, «не поддающийся классификации по своей канцерогенности для человека», однако было обнаружено, что он обладает канцерогенными свойствами у новорожденных мышей в соответствии с краткосрочным анализом опухоли легкого (Busby <i>et al.</i> , 1984).
Пирен (бензо[def] фенантрен)	$C_{16}H_{10}$ 	Хотя он не так опасен, как бензопирен, исследования на животных показали, что пирен токсичен для почек и печени.
Хризен (1,2-бензофенантрен)	$C_{18}H_{12}$ 	Как и в случае с другими ПАУ, считается, что хризен является канцерогеном для человека. Некоторые данные свидетельствуют о том, что он вызывает рак у лабораторных животных, но хризен часто загрязнен более сильнодействующими канцерогенными соединениями. Считается, что токсичность хризена составляет около 1% от токсичности бензо(а)пирена.
Бензо[а]пирен (пентацикло-[10.6.2.0 ^{2,7} .0 ^{9,19} .0 ^{16,20}]-икоса-1,3,5,7,9,11,13,15,17,19-декаен)	$C_{20}H_{12}$ 	В 2012 году IARC отнесло бензопирен к группе канцерогенных для человека веществ (группа 1). Механизм действия бензопирена состоит в его превращении в процессе метаболизма в химически активные вещества, образующие ковалентные связи с ДНК. Эти ДНК-аддукты индуцируют мутации в онкогене K-RAS и гене-супрессоре опухолей TP53 в опухолях легких человека и соответствующих генах опухолей легких мыши. Непосредственное воздействие бензопирена и содержащих его смесей вызывает и другие генетические повреждения.
Бензо[ghi]перилен (6,7-этенперилен)	$C_{22}H_{12}$ 	Он является продуктом неполного сгорания и содержится в табачном дыме, автомобильных выхлопах, промышленных выбросах, мясных продуктах, приготовленных на гриле, и пищевых маслах. Это соединение сильно накапливается в организмах и окружающей среде и предположительно является мутагенным и канцерогенным.
Дибензо[а,h]пирен (3,4-9,10-дибензопирен)	$C_{24}H_{14}$ 	Вызывает рак легких.
Бензо(с)флуорен (тетрацикло-[8.7.0.0 ^{2,7} .0 ^{12,17}]-гептадека-1,3,5,7,9,12,14,16-октаен)	$C_{17}H_{12}$ 	Карциногенные метаболиты бензо[с]флуорена связываются с ДНК, что приводит к раскрытию эпоксидного кольца в бензо[с]флуореновом анти- и син-диолепексиде. Метаболиты бензо[с]флуорена связываются с ДНК еще неизвестным образом. Когда аддукт ДНК образуется в месте, критически важном для регуляции дифференцировки или роста клеток, он может вызвать рак. Кроме того, известно, что больше всего страдают клетки с быстрой репликацией, такие как костный мозг, кожа и легочная ткань, в то время как ткани с более медленным обменом веществ, такие как печень, менее восприимчивы. Воздействие бензо[с]флуорена <i>in vivo</i> приводит к развитию в основном опухолей легких, где он действует как аддуктор ДНК.

образуя воду и углекислый газ. Однако неполное сгорание приводит к образованию большого количества второстепенных органических соединений, которые затем рекомбинируют в новые вещества, включая ПАУ. Эта группа в основном включает ПАУ, которые могут образовываться при обработке пищевых продуктов. Большинство пирогенных источников ПАУ представляют собой сложные соединения, состоящие преимущественно из четырех, пяти и шести колец [51].

ПАУ имеют бесцветный или бледно-желтый цвет. Их молекулы состоят из атомов углерода и водорода, формирующих бензольные кольца (не менее двух), которые могут соединяться в линейные, кластерные или угловые структуры. Из-за своей сложной структуры и относительно высокого молекулярного веса ПАУ обладают низкой летучестью и остаются твердыми при комнатной температуре. Широкое распространение ПАУ приводит к тому, что люди подвергаются их воздействию различными способами: через кожу и при вдыхании или проглатывании. По данным T. Rengarajan, более 70% некурящих людей сталкиваются с ПАУ из-за употребления загрязненных продуктов [52]. F. Shoaee и коллеги предполагают, что этот показатель может достигать 88–98% [53].

LMW-ПАУ представляют собой летучие соединения с относительно низкой токсичностью. В отличие от них, HMW-ПАУ обладают большей стабильностью и более высокой токсичностью, что связано с их устойчивостью к нуклеофильным атакам, обусловленной плотными π -электронами в ароматических кольцах. С увеличением молекулярной массы растворимость в воде снижается, в то время как температуры плавления и кипения возрастают из-за увеличенной липофильности. Эта повышенная липофильность способствует биоаккумуляции данных соединений в живых организмах [54–58].

ПАУ являются неполярными и липофильными веществами, что позволяет им легко растворяться в жирах и связываться с клеточными мембранами, нарушая их структуру и функции. Наиболее опасные ПАУ, содержащиеся в пищевых продуктах, обычно имеют от 2 до 7 ароматических колец. Среди них бензо[а]пирен выделяется своей высокой жирорастворимостью, что позволяет ему связываться с хиломикронами и липопротеинами. Это способствует его проникновению в системы всасывания и распределения липидов, что в свою очередь приводит к биоаккумуляции в печени и тонком кишечнике — ключевых органах этих процессов. Накопление бензо[а]пирена в жировых тканях вызывает опасения, что воздействие ПАУ и образование аддуктов ПАУ-ДНК могут повышать риск рака груди. Однако доказательства этой связи остаются неубедительными из-за сложности взаимодействий. Дети могут быть подвержены риску развития рака, согласно данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), который может быть связан с воздействием ПАУ. Важно

отметить, что современные исследования фокусируются на ПАУ, содержащихся как в продуктах питания, так и в окружающей среде [59–63].

ПАУ на здоровье человека зависит от типа воздействия, концентрации и относительной токсичности этих веществ. Многие из них признаны канцерогенными, мутагенными и тератогенными. Бензо[а]пирен, который считается высокоактивным канцерогеном, был классифицирован Международным агентством по изучению рака (IARC) как канцероген группы 1. Это соединение широко используется в качестве маркера для оценки уровней загрязнения ПАУ и в клинических исследованиях, изучающих связь между ПАУ и различными заболеваниями [64, 65].

Бензо[а]пирен образует метаболиты, способные формировать ДНК-аддукты и вызывать хромосомные aberrации. Если повреждения ДНК не будут эффективно устранены до репликации, это может привести к мутациям и разрывам нитей ДНК [44]. Кроме того, бензо[а]пирен вызывает окислительный стресс, хроническое воспаление и воспалительные каскады, которые все связаны с развитием рака через негенотоксические механизмы.

ПАУ могут вызывать негенотоксические эффекты. Они способствуют высвобождению провоспалительных цитокинов, что приводит к воспалению и изменению структуры сосудов. Эти процессы могут ускорить прогрессирование и нестабильность атеросклеротических бляшек, что в свою очередь способствует развитию атеросклероза. Воздействие ПАУ может увеличить риск сердечно-сосудистых заболеваний, таких как атеросклероз, гипертония, тромбоз и инфаркт миокарда. ВОЗ связывает ПАУ с проблемами нейроразвития у детей. Исследования на животных показывают негативное влияние на нервно-мышечную функцию, координацию и сенсомоторное развитие, а также на когнитивные функции у молодежи [66].

Борьба с ПАУ в пищевых продуктах имеет большое значение, особенно в отношении таких основных продуктов, как молоко. Молоко является основой любого рациона питания благодаря своему положительному влиянию на развитие организма, что делает присутствие ПАУ в молочных продуктах серьезной проблемой.

Липофильные ПАУ имеют свойство накапливаться в жирных пищевых продуктах, включая молоко и молочные продукты. Эти продукты, обладая высокой пищевой ценностью, широко потребляются детьми и пожилыми людьми по всему миру как основные источники питания [67–69].

Присутствие ПАУ в молоке и молочных продуктах во многом обусловлено загрязнением окружающей среды, которое возникает из-за кормов, воды и трав, а также из-за высокотемпературных методов обработки, используемых в процессе переработки молока (рис. 3). ПАУ в пищевых продуктах могут возникать как в результате загрязнения сырья окружающей средой (например, почвой),

так и в процессе высокотемпературной обработки. Точные механизмы их образования на уровне технологических процессов пока остаются неизвестными. Выделяют три основных механизма, которые оказывают значительное влияние на образование ПАУ в зависимости от типа термической обработки. Однако эти механизмы объясняют лишь часть причин появления ПАУ в пищевых продуктах. В научной литературе подчеркивается, что этот процесс является «чрезвычайно сложным». ПАУ формируются в ходе пиролиза и неполного сгорания органических веществ. При нагревании ключевые компоненты пищи, такие как глюкоза, аминокислоты и жирные кислоты, разлагаются и циклизуются. Разнообразие и количество ПАУ, образующихся в пищевых продуктах в процессе обработки, зависят от нескольких факторов [70–74]. К ним относятся расстояние до источника тепла, состав используемого топлива, условия обработки, время приготовления, а также методы, такие как повторное использование, конширование, измельчение и хранение.

Существуют три основных пути их образования:

1. Пиролиз пищевых компонентов (белков, жиров и углеводов) начинается при температуре выше 200 °С, а синтез ПАУ усиливается в диапазоне от 500 до 900 °С. Наибольший вклад в образование ПАУ вносит пиролиз жиров.

2. Капание липидов на источники тепла во время термической обработки приводит к образованию более летучих ПАУ, которые оседают на поверхности пищи по мере подъема дыма.

3. Неполное сгорание древесного угля, особенно при определенных методах приготовления пищи, способствует образованию ПАУ, которые «прилипают» к поверхностям продуктов [71–79].

На уровне химических реакций, несмотря на неопределенность среди исследователей, было выделено и описано несколько процессов. К ним относятся отщепление водорода с присоединением ацетилена (НА-М), конденсация ПАУ с НАМ,

образование ПАУ под воздействием радикалов, реакции Дильса — Альдера и присоединение фенила с циклизацией (АСР).

Из-за канцерогенных свойств ПАУ Агентство по охране окружающей среды (EPA) в США и Европейское агентство по безопасности пищевых продуктов (EFSA) ввели ограничения на их содержание в пищевых продуктах в 2002 году. Научный комитет по пищевым продуктам (SCF) выделил 15 генотоксичных ПАУ из 33 протестированных в качестве приоритетных соединений для оценки их потребления с пищей. Бензо[а]пирен (BaP) был предложен в качестве биомаркера для мониторинга воздействия ПАУ как из пищевых продуктов, так и из окружающей среды [80–83].

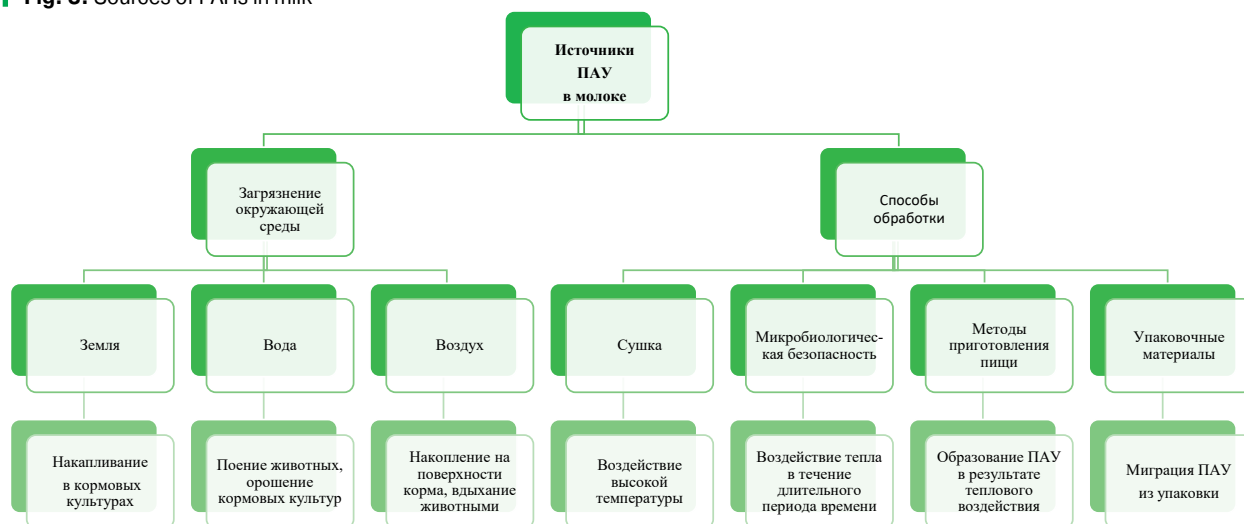
В Европейском союзе регулирование ПАУ в пищевых продуктах осуществляется в соответствии с Регламентом (ЕС) 2023/915. Этот регламент устанавливает предельные значения для бензо(а)пирена и суммы четырех ПАУ, в которую входят бензо(а)пирен, бензо(а)антрацен, бензо(б)флуорантен и хризен. Бензо[а]пирен выделяется благодаря своей высокой канцерогенности, и EFSA выбрало сумму этих четырех ПАУ в качестве надежного индикатора их содержания в пищевых продуктах.

Выбор правильного метода экстракции и измерения ПАУ имеет ключевое значение для получения достоверных результатов. Молоко представляет собой сложную матрицу, в которой липофильные ПАУ находятся не только в диспергированных каплях, но и связаны с жирами, которые в свою очередь могут быть удержаны в белковых структурах. Поэтому «идеальный» процесс экстракции должен включать не только перенос ПАУ из матрицы в растворитель (молоко → жир → растворитель), но и этап высвобождения жира. Это обеспечит более точные измерения и надежные результаты [84].

Проблема заключается в наличии множества мешающих веществ в матрицах молочных

Рис. 3. Источники ПАУ в молоке

Fig. 3. Sources of PAHs in milk



продуктов. Мицеллы казеина могут изменять свою структуру под воздействием температуры и pH, что приводит к захвату липидов в их состав. Кроме этих липидов, в мицеллы могут внедряться липофильные молекулы ПАУ, что создает дополнительные трудности при их извлечении. Кроме того, молоко содержит такие структуры, как мембрана жировых глобул молока — трехслойная оболочка, формирующая жировые глобулы. Благодаря своей неполярности ПАУ могут взаимодействовать с этими мембранами. Распад мицелл, вызванный изменениями электростатических взаимодействий, увеличивает жесткость мембраны и способствует образованию агрегатов «белок — липид», при этом молекулы белка располагаются на внешнем слое.

Таким образом, необходимо освобождать ПАУ из различных структур во время экстракции из молока и переработанных молочных продуктов. Неправильное выполнение этого этапа может привести к неточным аналитическим результатам, так как ПАУ могут экстрагироваться вместе с другими веществами, что усложняет их разделение и количественное определение. Существующие методы экстракции и идентификации ПАУ имеют значительные ограничения. Многие традиционные подходы, такие как жидкостная экстракция (ЖЭ) и экстракция Сокслета, требуют много времени, усилий и часто больших объемов опасных растворителей. Кроме того, высокое содержание жира в молочных продуктах, способствующее

накоплению ПАУ, усложняет процесс экстракции и требует использования больших объемов растворителей. Поэтому целесообразно разрабатывать новые перспективные методы, такие как твердофазная экстракция (ТФЭ) или твердофазная микроэкстракция (ТФМЭ). В настоящее время они более популярны и эффективны, чем методы, которые использовались ранее [85–87].

Кроме этапа высвобождения жира, важным аспектом является выбор подходящих растворителей для извлечения жира из молока. Этот выбор зависит от полярных и неполярных свойств матрицы и молекул ПАУ, а также от метода извлечения и применяемых хроматографических техник (таких как ВЭЖХ или ГХ).

Методы извлечения и очистки

Е.-S. Rawash и коллеги [88] обнаружили различия в уровнях ПАУ в зависимости от типа молока. В жидком молоке, прошедшем ультрапастеризацию, уровень ПАУ составил около 6,07 мкг/г, в то время как в сухом молоке этот показатель достиг 8,2 мкг/г. Была зафиксирована потеря низкомолекулярного нафталина, что произошло из-за деградации или испарения во время анализа (табл. 2).

К. Yап и его команда [92] отметили, что молоко с более высоким содержанием жира содержит больше ПАУ.

Исследования, проведенные Y. Sun и др. [93], показали, что уровень высокомолекулярных ПАУ значительно ниже в обезжиренном молоке. Это

Таблица 2. Примеры методов экстракции для анализа ПАУ в молоке

Table 2. Examples of extraction methods for PAH analysis in milk

Образец	Метод	Методика	ПАУ	Ссылка
Сухое молоко	Экстракция QuEChERS	1. Образец был гомогенизирован. 2. Были взяты 5 г молока. 3. Экстракционную смесь центрифугировали при 2500 об/мин 5 мин. 4. Концентрированный экстракт растворили в 5 мл гексана. 5. Подготавливали колонку для ТФЭ, заполненную активированным силикагелем и 1 г Na ₂ TAK ₄ . 6. Экстракт загружали в колонку и промывали 50 мл гексана. 7. Собранный элюент концентрировали с помощью роторного испарителя. 8. Образец растворили в 0,5 мл гексана.	Acenyl, Flu, Phen, Ant, Pyr, BaA, Chr, BbF, BkF, BaP, IcP, DhA, BghiP	[88]
Сырое молоко	Экстракция QuEChERS	1. 5 мл гомогенизированного молока перенесли в коническую пробирку и встряхивали в течение 1 мин. 2. Добавили 15 мл гексана:аcetона (1:1) и встряхивали. 3. Добавляли 10 мл гексана:аcetона (1:1) и экстрагировали. 4. К смеси добавили сульфат магния (6,0 г) и NaCl (1,5 г). 5. Смесь центрифугировали в течение 5 мин. при 2500 об/мин., и ПАУ были выделены с помощью SPE. 6. Концентрированные экстракты растворяли в 5 мл н-гексана, загружали в колонку с активированным силикагелем и 1 г Na ₂ TAK ₄ . 7. Конечные элюаты (50 мл) концентрировали и растворяли в гексане.	Nap, 2M, 1M, Acenyl, Acen, Flu, Phen, Ant, Fluor, Pyr, BaA, Chr, BbF, BkF, BaP, IcP, DhA	[91]
Молоко	LLE после омыления	1. Молоко гомогенизировали при 40 °C в течение 30 мин. 2. 8 мл 0,4 М NaOH в EtOH добавили к 4 мл молока. 3. Гомогенизировали в течение 1 мин. 4. Выпаривали при 40 °C на водяной бане до 1 мл. 5. Сушили в атмосфере азота. 6. Растворили в 1 мл изооктана. 7. Очистили на колонке с 6 г силикагеля и 1 г безводного сульфата натрия. 8. Колонку промывали 20 мл гексана, 30 мл гексана:дихлорметана (9:1) и 20 мл (1:1). 9. Органическую фазу выпаривали при 40 °C до почти сухого состояния. 10. Перенесли 1 мл во флакон и высушили в атмосфере азота. 11. Добавили 250 µL изооктан и хранили при -20 °C.	Nap, 2M, 1M, Acenyl, Acen, Flu, Phen, Ant, Fluor, Pyr, BaA, Chr, BbF, BkF, BaP, IcP, DhA	[92]
Молоко	LLE после омыления	1. Образцы молока (2 г) омыляли 4,0 мл 0,4 М раствора NaOH в EtOH. 2. 100 µL раствора изооктана в CH ₂ добавляли CN и нагревали смесь при 60 °C на водяной бане 30 мин. 3. После охлаждения до комнатной температуры смесь дважды экстрагировали 2 мл гексана. 4. Гексан выпаривали, а остаток извлекали с помощью 100 µL ACN.	Ant, Fluor, BaP, Phen, Pyr, BaA, Chr, BghiP, BbF, BkF, BaP, IcP, DhA	[93]

можно объяснить тем, что ПАУ являются высоколипофильными соединениями. В исследованиях была установлена положительная корреляция между содержанием жира и уровнем ПАУ в молоке, поэтому важным этапом подготовки образцов для анализа является гомогенизация, которая может быть достигнута путем тщательного перемешивания, встряхивания или обработки ультразвуком. В противном случае результаты могут оказаться недостоверными.

QuEChERS — это метод твердофазной экстракции для обнаружения остатков пестицидов (рис. 4), антибиотиков, ПАУ и других соединений в пищевых продуктах. Название представляет собой слово аббревиатуру, образованное от «быстрый, простой, дешевый, эффективный, точный и надежный».

К. Yan и коллеги [92] оптимизировали метод QuEChERS, сосредоточив внимание на выборе подходящей смеси экстракционных растворителей и использовании деионизированной воды в процедуре EMR-Lipid. Они установили, что наилучшие показатели восстановления и точности достигаются при использовании ацетонитрила и ацетона в соотношении 3:2. Кроме того, использование 3 мл деионизированной воды для активации EMR-Lipid способствовало улучшению параметров восстановления.

G.M.M.A. Hasan и его команда [89] применили метод QuEChERS для извлечения ПАУ. В их исследовании использовались 16 стандартных соединений ПАУ в качестве индикаторов загрязнения окружающей среды. Эффективность извлечения составила от 67,90% (для хризена) до 99,76% (для индено(1,2,3-сд)пирена), при этом значения предела обнаружения (LOD) варьировались от 0,3 до 1,0 нг/г, а пределы количественного определения (LOQ) находились в диапазоне от 1,0 до 4,0 нг/г.

J. Chay-Rincón и его команда [90] протестировали три метода жидкостной экстракции для подготовки образцов молока с целью определения ПАУ с использованием газового хроматографа, оснащенного пламенно-ионизационным и масс-детекторами. Первый метод, предшествующий омылению, показал удовлетворительные результаты только для ПАУ с низкой молекулярной массой (LMW).

Исследователи [94] отметили, что температура омыления значительно влияет на результаты анализа: с повышением температуры увеличиваются потери LMW.

Сорбент EMR-Lipid реализует эксклюзионные и неполярные взаимодействия с компонентами матрицы, тем самым обеспечивая надежную очистку образца. Данный сорбент используется

Рис. 4. Метод QuEChERS для определения пестицидов в пищевых продуктах

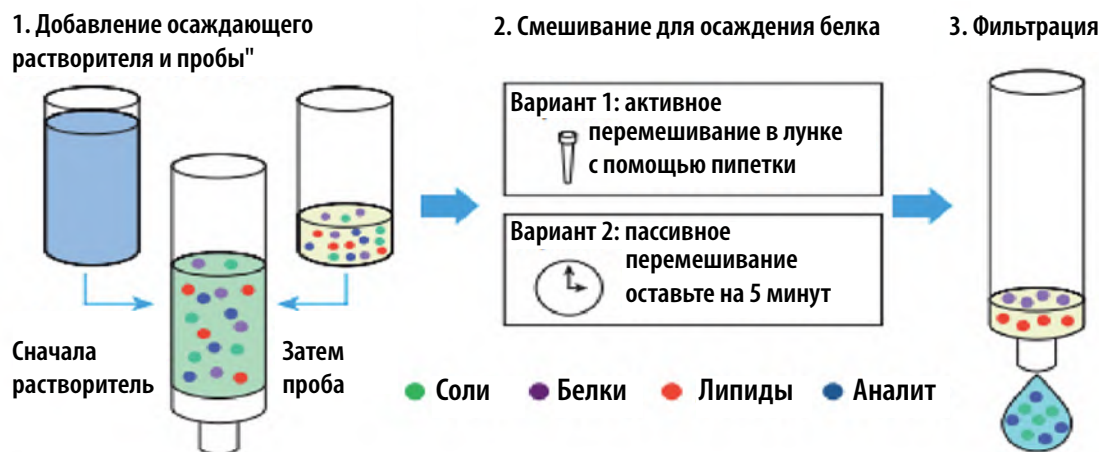
Fig. 4. QuEChERS method for the determination of pesticides in food products

1 этап - экстракция пестицидов из образца



2 этап - твердофазная (ТФЭ) очистка экстракта



Рис. 5. Методика очистки пробы от жиров с использованием сорбента EMR-Lipid**Fig. 5.** Methodology for purifying a sample from fats using the EMR-Lipid sorbent

в различных продуктах для подготовки проб со сложной матрицей — биологических образцов и продуктов с высоким содержанием жиров (рис. 5).

A.M. Girelli и коллеги [95] применяли метод омыления с теми же химическими веществами, что и J. Chay-Rincón [90]. Однако они проводили омыление в течение 30 мин. при температуре 60 °С, используя циклогексан или ацетонитрил для экстракции. Исследователи обнаружили зависимость между восстановлением и летучестью ПАУ: более летучие соединения демонстрировали более низкое восстановление, что указывает на большие потери аналита.

N. Kishikawa и его команда [91] в процессе оптимизации метода протестировали три экстракционных растворителя: гексан, циклогексан и толуол. Они не обнаружили значительных различий в эффективности экстракции. Была выявлена зависимость эффективности экстракции от параметров омыления, таких как концентрация гидроксида натрия и этанола, а также от времени процесса. Наилучшие результаты экстракции ПАУ были достигнуты при концентрации 0,6–3,0 М NaOH и 60–100% этанола. Во втором методе [58] использовалась экстракция с помощью раствора детергента. Одной из особенностей этого метода стало использование большого объема образца для экстракции — 250 мл молока в соотношении «образец — детергент» 1:1. При температуре 90 °С было получено меньшее извлечение низкомолекулярных (LMW) ПАУ по сравнению с высокомолекулярными (HMW). Третий метод, испытанный Chay-Rincón и др. [90], представляет собой экстракцию «жидкость — жидкость», основанную на методе экстракции жира из молока (AOAC 989.05).

Экстракция ПАУ проводилась с использованием смеси диэтилового и петролейного эфиров. Для испарения растворителей была выбрана низкая температура (40 °С), что способствовало улучшению восстановления ПАУ по сравнению с методом экстракции с использованием раствора детергента. S. Dobrinás и ее команда [96] применили простую экстракцию гексаном с

последующей очисткой для анализа ПАУ в детских молочных смесях. Исследователи отметили, что эффективность метода может достигать 95–98%, однако не предоставили дополнительных данных, подтверждающих достижение таких показателей.

При экстракции методом «жидкость — жидкость» наилучшие результаты извлечения были достигнуты с использованием смеси дихлорметана и н-гексана в соотношении 4:1 (в/в). В случае ТФЭ с колонкой C18 наивысшая эффективность была отмечена для хлороформа. Оба метода экстракции продемонстрировали сопоставимые результаты и подтвердили свою пригодность для анализа ПАУ в молоке.

Извлеченные и очищенные аналиты ПАУ подвергаются инструментальному анализу, чаще всего с использованием хроматографических методов. К ним относятся высокоэффективная жидкостная хроматография (ВЭЖХ) и газовая хроматография (ГХ), которые обеспечивают эффективное разделение аналитов. Для идентификации и количественного определения отдельных полициклических углеводородов применяются соответствующие детекторы [97–101].

В таблице 3 представлены примеры исследований ПАУ на различных устройствах. Другие методы применяются реже и, похоже, вызывают интерес у исследователей. К ним относятся спектрометрический анализ (фосфориметрия при комнатной температуре (RTP), молекулярный флуоресцентный анализ (MFA) и поверхностно-усиленная рамановская спектроскопия (SERS), метод хемилюминесценции (CL), электрохимические методы, а также иммунологические методы обнаружения, такие как иммуноферментный анализ (ELISA). Разработка новых методов, особенно тех, которые можно использовать с готовыми наборами, может быть оправдана благодаря сокращению времени анализа и упрощению процедуры исследования. Тем не менее хроматографические методы по-прежнему остаются референтными для этих подходов.

Таблица 3. Хроматографические методы анализа ПАУ в матрице молока

Table 3. Chromatographic methods for the analysis of PAHs in milk matrix

Образец	Метод	Результаты	ПАУ	Ссылка
Коровье молоко, грудное молоко и детская смесь	HPLC + FLD	ΣПАУ были обнаружены при 0,23–2,01, 0,19–2,15 и 1,68–2,28 мкг/кг в молоке, грудном молоке и детской смеси	Ant, Fluo, BaP, Phen, Pyr, BaA, Chr, BghiP, BbF, BkF, IcP, DhA	[91]
Грудное молоко	HPLC + FSFD	Образец грудного молока содержал: 8,03 нг/мл 2-ОНФ; 4,98 нг/мл (2-/3-)-ОНФ; 12,87 нг/мл (1-/9-)-ОНФ; 3,14 нг/мл 4-ОНФ; 3,45 нг/мл 1-ОНРy и 27,43 нг/мл 3-ОНBz[a]Py.	OPHAPH	[102]
Грудное молоко и детская смесь	HPLC + FLD	Средние концентрации ΣПАУ составили 114,93 мкг/кг в грудном молоке и 53,68 мкг/кг в детской смеси.	Acen, Fluo, Flu, Pyr, Phen, BaA, Ant, Chr, BbF, BkF, BaP, DhA, BghiP, IcP	[103]
Коровье молоко	HPLC + FLD	Всего (ΣПАУ 5,86 мкг/кг) и полуобезжиренный (ΣПАУ 16,7 мкг/кг) пастеризованное молоко имело более низкий уровень ПАУ, чем ультрапастеризованное (ΣПАУ 18,6 и 18,3 мкг/кг). Для обезжиренного молока результаты были следующими: пастеризованный — ΣПАУ 26,6 мкг/кг; УПМ — ΣПАУ 17,8 мкг/кг.	Ant, Fluo, BaP, Phen, Pyr, BaA, Chr, BghiP, BbF, BkF, IcP, DhA	[95]
Сухое молоко	HPLC + UV-VIS + FLD	ΣПАУ были между 5,77 и 427,28 мкг/кг сухого молока.	Acen, Fluo, Flu, Pyr, Phen, BaA, Ant, Chr, BbF, BkF, BaP, DhA, BghiP, IcP	[104]
Молочные продукты	GC + MS	Концентрация ΣПАУ варьировалась от 47 нг/кг в цельном овечьем молоке до 2120 нг/кг в коровьем масле.	16 ПАУ, включенных в перечень ЕС	[84]
Коровье молоко	GC + MS	Содержание ПАУ 310 мкг/л	16 ПАУ, включенных в перечень США	[105]
Коровье молоко	GC + MS	Были обнаружены только BaA (0,5497 нг/г) и Chr (1,077 нг/г).	16 ПАУ, включенных в перечень ЕС	[89]
Коровье молоко	GC + MS	Обнаруженные концентрации ПАУ варьируются от 0,1 до 16,2 нг/г.	Acen, Fluo, Flu, Pyr, Phen, BaA, Ant, Chr, BbF, BkF, BaP, DhA, BghiP, IcP	[106]
Коровье молоко и молочные продукты	GC + MS	ΣПАУ обнаружены: в сухом молоке — 8,2 мкг/г, ультрапастеризованное молоко — 6,075 мкг/г, сырое молоко — 1,302 мкг/г.	Acen, Fluo, Flu, Pyr, Phen, BaA, Ant, Chr, BbF, BkF, BaP, DhA, BghiP, IcP	[88]
Коровье молоко	GC + MS	Образцы из Европы и Океании — Σ ПАУ и BaP составили 7,34–13,60 мкг/кг и 0,46–0,83 мкг/кг. Образцы из Китая — Σ ПАУ и BaP составили 4,89–16,76 мкг/кг и 0,37–0,77 мкг/кг.	16 ПАУ, включенных в перечень ЕС	[93]
Детские смеси	GC + MS	Средние концентрации ПАУ — от 0,015 до 0,37 мкг/кг.	16 ПАУ, включенных в перечень США	[96]
Детские смеси	GC + MS	Chr был обнаружен в концентрациях от 0,53 до 0,95 мкг/кг. BbF был определен в 11,1% детских смесей и смесей для детей старшего возраста. Концентрации BaP в 55,5% образцов превысили предел количественного определения.	BaA, Chr, BbF, BaP	[80]
Коровье молоко и растительные напитки	HS + GC + MS	Извлечение ПАУ из молока с добавками варьировалось от 89,2 до 112,7%.	Acen, Fluo, Flu, Pyr, Phen, BaA, Ant, Chr, BbF, BkF, BaP, DhA, BghiP, IcP	[107]
Коровье молоко	HS + GC + MS	Концентрации Phen, Ant, Fluo и Pyr составили 4,1, 0,9, 0,8 и 0,2 нг/г, что ниже пределов количественного определения предлагаемого метода.	Acen, Flu, Phen, Ant, Fluo, Pyr	[108]
Коровье молоко	GC + FID	Концентрации ΣПАУ варьировались от 15,6 до 1711,8 мкг/кг.	16 ПАУ, включенных в перечень ЕС	[109]

Высокоэффективная жидкостная хроматография

Жидкостная хроматография (ЖХ) использует жидкость в качестве подвижной фазы и в основном применяется для анализа органических соединений. В частности, ВЭЖХ в сочетании с флуоресцентным детектором (ФЛД) широко используется для определения ПАУ в пищевых матрицах. Этот метод выбирают благодаря его высокой

селективности и чувствительности. Хотя применяются и другие детекторы, такие как УФ-видимый (UV-Vis), диодный матричный (DAD) и быстросканирующий флуоресцентный детектор (FSFD), они используются реже и чаще служат дополнительными методами для подтверждения результатов. Метод FSFS основан на измерении спектра выходящего потока из хроматографической колонки. Результаты фиксируются при определенной

длине волны возбуждения (или испускания) путем быстрого сканирования длины волны, что позволяет получать трехмерные хроматограммы.

Методы могут быть адаптированы для оборудования, доступного в данной лаборатории. Жидкостная хроматография в сочетании с масс-спектрометрией (ЖХ-МС) редко используется в качестве предпочтительного метода из-за сложности достижения адекватной ионизации молекул ПАУ. Решение этой проблемы может быть затруднительным и не всегда приводит к удовлетворительным результатам.

ПАУ представляют собой очень стабильные молекулы, которые сложно ионизировать при атмосферном давлении с использованием традиционных методов, таких как ионизация электро-распылением (ESI) или химическая ионизация при атмосферном давлении (APCI). Трудности с ионизацией этих молекул связаны с их неполярной природой. Однако фотоионизация при атмосферном давлении может стать возможным решением этой проблемы. Этот метод продемонстрировал в 60 раз большую чувствительность при обнаружении метаболитов ПАУ по сравнению с традиционными методами ионизации, которые обычно неэффективны для неполярных молекул.

В отличие от газовой хроматографии, ВЭЖХ-ФЛД не сталкивается с проблемами, связанными с низкой летучестью ПАУ. Тем не менее некоторые из них, такие как циклопента[сд]пирен, обладают низкой флуоресценцией, что затрудняет анализ при низких уровнях загрязнения.

N. Kishikawa и коллеги [91] применили метод ВЭЖХ-ФЛД для анализа различных молочных продуктов, включая человеческое, коровье молоко, сгущенное молоко и детские смеси. Они достигли уровня извлечения 90% и выше, сделав вывод о том, что этот аналитический метод подходит для тестирования различных молочных продуктов.

E. Martin-Tornero [102] и его команда использовали ВЭЖХ для оценки потенциального воздействия загрязнения ПАУ, применяя маркеры ОНРАН. Эти маркеры менее липофильны, чем ПАУ, и, будучи продуктами их метаболизма, могут служить хорошими индикаторами. Исследователи использовали быстрое сканирующее флуориметрическое обнаружение и получили уровень извлечения всего 50%, что зависит от метода экстракции. Это подчеркивает необходимость корректировки методики и важность выбора подходящего метода экстракции. Данное исследование является одним из немногих, посвященных анализу ОНРАН в контексте оценки опасности ПАУ.

S. Santonicola и коллеги [103] провели тестирование различных образцов, включая грудное молоко и детское питание, однако не применяли маркеры. В результате они использовали наиболее распространенный метод ВЭЖХ-ФЛД. Полученные данные показали, что грудное молоко содержало более высокие уровни загрязняющих

веществ по сравнению с детским питанием. Это может быть связано с местом проживания матерей, чье молоко было исследовано. Команда A.M. Girelli [95] использовала тот же хроматографический метод и детектор для анализа коровьего и козьего молока, а также растительных напитков и обнаружила различные уровни восстановления (70–115%) в зависимости от конкретного ПАУ.

В своем анализе они рассмотрели влияние растворителей на восстановление. Авторы подчеркнули, что технологические процессы, такие как термическая обработка и удаление жира, могут влиять на содержание ПАУ в молоке и напитках. Подобно исследованию E. Martin-Tornero [102], изучили метаболиты, ОНРАН и сами ПАУ, однако они применили флуоресцентное обнаружение вместо быстрого сканирующего флуориметрического метода. Их результаты показали восстановление в диапазоне 79–116%. Они отметили, что анализ поведения ПАУ и их метаболитов в различных средах, особенно в водных, затрудняет количественное определение. Исследования показали, что хризен и бензо(к)флуорен были обнаружены исключительно в пастеризованном молоке, что указывает на то, что применяемая термическая обработка, безусловно, оказала влияние на образование ПАУ.

V.A. García Londoño и коллеги [104] использовали ВЭЖХ в сочетании с УФ-видимой и флуоресцентной детекцией для анализа. Они достигли степени извлечения всех ПАУ более 79%. При оценке коммерчески доступных молочных порошков исследователи пришли к выводу, что продукты из Бразилии и Аргентины содержат тревожно высокий уровень загрязнения углеводородами.

Газовая хроматография

ГХ применяет газ в качестве подвижной фазы и делится на газотвердую и газожидкостную хроматографию в зависимости от типа неподвижной фазы. В современных методах ГХ для разделения ПАУ часто используются металлоорганические структуры (МОС), графеновые листы или графитовый нитрид углерода.

Обнаружение с использованием метода ГХ-масс-спектрометрии (ГХ-МС) представляет собой довольно сложную задачу из-за низкой летучести высокомолекулярных ПАУ, таких как дибензопирены. Некоторые из этих соединений плохо разделяются в капиллярных колонках. Кроме того, могут возникать помехи от ПАУ, которые не являются объектами исследования (например, трифенилен).

В сравнении с 16 ПАУ, перечисленными Агентством по охране окружающей среды США, разделение 15 ПАУ, включенных в список Европейского союза, еще более затруднено из-за их более высокого уровня структурного сходства. Тем не менее ГХ-МС остается эффективным методом для разделения и идентификации ПАУ в сложных матрицах, таких как молоко. Этот метод требует

небольшого объема образца, а в сочетании с методом твердофазной микроэкстракции в режиме HeadSpace (HS-SPME) он может значительно упростить процесс. Такое сочетание позволяет избежать сложных методов экстракции и минимизировать потенциальные помехи, вызванные матрицей, которые могут возникнуть при использовании других методов экстракции.

L. Palacios Colón и коллеги [84] применили ГХ и МС для выявления ПАУ в различных молочных продуктах. Они оценили эффективность своего метода как высокую с пределами обнаружения от 1 до 200 нг/кг, однако все выявленные ПАУ относились к более легким типам. В исследовании использовались различные молочные матрицы, и эффективность извлечения отдельных ПАУ варьировалась в зависимости от тестируемого продукта, при этом все показатели превышали 80%. В детских смесях на основе молока, обработанного при высоких температурах, загрязнения ПАУ не обнаружили, что может свидетельствовать о снижении дополнительного образования ПАУ в молоке.

Подобный метод и колонку HP-5MS, одну из самых популярных для анализа ПАУ, использовали T.-L. Chung и коллеги [105] в исследовании жидкого молока. Они выделили тяжелые и наиболее токсичные ПАУ, такие как бензо[а]пирен (BaP), среди более легких соединений. Исследователи указали на вероятные источники загрязнения молока в регионе Тайвань, связывая их с промышленной деятельностью и тяжелой промышленностью.

При этом исследователи не учитывали возможное влияние переработки молока и не проводили измерения восстановления. G.M.M.A. Hasan и коллеги [89], применяя ГХ с МС, достигли уровня восстановления от 67,90% (Chr) до 99,76% (IcP) и выявили наличие BaA и Chr только в образцах сырого молока из Бангладеш. Они отметили, что этот уровень является низким и образцы происходили из регионов с «более высокой человеческой активностью».

N. Grova и коллеги [106] использовали колонку DB-XLB и сосредоточились на загрязнении окружающей среды, применяя сырое молоко. Их исследования показали, что уровень загрязнения в образцах, взятых вокруг цементного завода, был статистически выше. Однако они не рассматривали вопрос восстановления. E.-S. Rawash и его команда [88] исследовали различные матрицы, включая копченый сыр и жидкое молоко, но не проводили измерения восстановления. Они предположили, что часть загрязнения ПАУ в молочных продуктах возникает в процессе технологической обработки, например во время копчения и пастеризации.

Кроме того, они отметили, что не смогли обнаружить нафталин в образцах, что, по их мнению, могло быть связано с его деградацией или испарением в ходе лабораторных исследований. Идентификация ПАУ проводилась с использованием времени удерживания. Y. Sun и коллеги [93],

применяя метод GG-MS, получили коэффициенты извлечения от 62,81 до 105,18% для уровня 5 мкг/кг от 68,46 до 113,86% для более высокого уровня — 10 мкг/кг. Они указали на необходимость оптимизации обработки для снижения накопления ПАУ в молоке.

S. Dobrinas и коллеги [96], а также H. Badibostan и его команда [80] провели исследования детских смесей, представляющих собой термообработанные молочные продукты. Первая группа достигла восстановления на уровне 95–98%, в то время как вторая группа зафиксировала восстановление в диапазоне 50–120%. Основные различия в их методологиях заключались в подходах к экстракции. Исследование, проведенное командой S. Dobrinas [46], сосредоточилось на европейских образцах и выявило низкие уровни загрязнения. В то же время H. Badibostan и коллеги [80], работая в Иране, обнаружили более настораживающие уровни ПАУ в формулах, отметив, что их концентрация может увеличиваться до 100 °C в процессе обработки.

Применение метода HS к ГХ позволяет сократить необходимость в традиционной экстракции и отличается от экстракции SPME. Это снижает количество манипуляций с образцом, которые могут на него повлиять. N. Aguinaga и коллеги [107] использовали оптимизированный метод HS и отметили, что менее летучие ПАУ требуют более высокой температуры для воздействия на волокна, однако слишком высокая температура негативно сказывается на покрытии волокна. Оптимизированный метод обеспечил восстановление выше 89% для всех протестированных ПАУ.

Подобный подход был применен W. Lin и его командой [108], которые подтвердили целесообразность использования HS для сложных матриц, требующих уникального процесса очистки с применением других хроматографических методов. В другом исследовании N. Aguinaga и коллеги [107] повторили метод HS и успешно идентифицировали 16 ПАУ, указанных в списке EPA США, в детских смесях, молоке, йогурте и растительных напитках, получив извлечения в диапазоне от 87,6 до 112%.

C.M.A. Iwegbue и F.I. Bassey [109] применили менее традиционный подход, объединив ГХ с пропорционально-интегрально-дифференциальным (ПИД) контролем. В результате им удалось достичь извлечения от 78,5 до 98,7% в подходящих образцах. Однако в своем обсуждении результатов они не уделили внимание влиянию выбранного метода на полученные данные. Тем не менее им удалось идентифицировать все 16 ПАУ из списка ЕС.

Обсуждаемые методы самыми популярными и эффективными для оценки ПАУ в молоке. Однако они достаточно сложны и требуют наличия хорошо оборудованных лабораторий, что ограничивает их практическое применение в молочной промышленности. Для успешной реализации необходимо сотрудничество между промышленностью и

профессиональными лабораториями, способными проводить анализы с использованием современных методов экстракции. Разработка более быстрых и простых методов позволит осуществлять постоянный мониторинг содержания ПАУ в молоке. Например, методы, использующие технологию HeadSpace, которые сокращают необходимость в многоэтапной экстракции, представляют собой многообещающее решение. Тем не менее текущие исследования в этой области должны быть более всесторонними, чтобы можно было делать окончательные выводы [110–114].

Другой подход заключается в сотрудничестве молочной промышленности с аналитическими лабораториями на этапах переработки и разработки продуктов. Оптимизация производственных процессов для снижения образования ПАУ может уменьшить необходимость в частом мониторинге, ограничиваясь лишь периодическими контрольными анализами.

Выводы/Conclusions

Хотя уровни ПАУ, обычно обнаруживаемые в молоке и молочных продуктах, относительно низки, их наличие связано с генотоксическими и провоспалительными рисками. Эта проблема становится более актуальной на фоне некоторых исследований, которые показывают, что в отдельных случаях уровни ПАУ могут превышать допустимые нормы. Молочные продукты являются основным источником питания для наиболее уязвимых групп населения, таких как дети и пожилые люди, для которых даже незначительное количество ПАУ может оказать негативное воздействие. Учитывая, что воздействие ПАУ может продолжаться

на протяжении всей жизни, начиная с рождения, крайне важно минимизировать их присутствие в повседневной жизни.

Необходимо продолжать исследования методов обнаружения ПАУ в молоке и молочных продуктах. Сложность этих матриц и поведение ПАУ затрудняют точные измерения. Тем не менее современные хроматографические методы, такие как ГХ и ВЭЖХ, позволяют выявлять даже низкие концентрации углеводов. Дальнейшие успехи в методах обнаружения во многом зависят от разработки эффективных методов экстракции. Новые подходы, такие как анализ HeadSpace (HS), твердофазная микроэкстракция (SPME) и твердофазная экстракция (SPE), демонстрируют значительный потенциал.

Молочная промышленность занимает важное место в обеспечении безопасности продукции, разрабатывая стратегии для снижения уровня ПАУ. Это включает в себя как борьбу с загрязнением окружающей среды, так и с ПАУ, возникающими в процессе производства. Исследователи могут способствовать этим усилиям, углубляя свои знания и разрабатывая стандартизированные, практические методы для снижения и обнаружения ПАУ в молочных продуктах.

Настоящий научный обзор демонстрирует важность точной диагностики ПАУ в молоке и молочных продуктах. Современная технология позволяет достичь надежных результатов, но требуются постоянные улучшения методов анализа и усиление контроля на производстве. В перспективе необходимы более эффективные и доступные способы тестирования, направленные на снижение рисков для потребителей.

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в работу. Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data. All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rebezov M.B., Temerbaeva M.V., Uryumtseva T.I. Results of mathematical analysis of experimental data fermentation of skimmed milk to produce a fermented milk product. *Bulletin of the Innovative University of Eurasia*. 2022; (3): 65–71. <https://www.elibrary.ru/wonjpw>
2. Serikova A. et al. Development of Technology of Fermented Milk Drink With Immune Stimulating Properties. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2018; 9(4): 495–500. <https://www.elibrary.ru/xrwrf>
3. Итбалакова А.Б., Муктарханова Р.Б., Матибаева А.И., Ребезов М.Б. Разработка технологии нового кисломолочного продукта с использованием микробиологического консорциума (патентный поиск). *Научно-практическое развитие АПК и производства продуктов здорового питания. Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной юбилею заслуженного работника высшей школы Российской Федерации доктора технических наук, профессора Н.Б. Гавриловой*. Омск: Омский государственный аграрный университет. 2025; 38–42. <https://www.elibrary.ru/lryjwd>
4. Темербаева М.В., Гаврилова Н.Б., Ребезов М.Б. Разработка биотехнологии молочного продукта для питания диабетиков. *Современное состояние, перспективы развития АПК и производства специализированных продуктов питания. Материалы Международной научно-практической конференции посвященной юбилею заслуженного работника высшей школы Российской Федерации доктора технических наук, профессора Н.Б. Гавриловой*. Омск: Омский государственный аграрный университет. 2020; 520–527. <https://www.elibrary.ru/ndipln>

REFERENCES

1. Rebezov M.B., Temerbaeva M.V., Uryumtseva T.I. Results of mathematical analysis of experimental data fermentation of skimmed milk to produce a fermented milk product. *Bulletin of the Innovative University of Eurasia*. 2022; (3): 65–71. <https://www.elibrary.ru/wonjpw>
2. Serikova A. et al. Development of Technology of Fermented Milk Drink With Immune Stimulating Properties. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2018; 9(4): 495–500. <https://www.elibrary.ru/xrwrf>
3. Itbalakova A.B., Mukhtarkhanova R.B., Matibayeva A.I., Rebezov M.B. Development of a new fermented milk product technology using a microbiological consortium (patent search). *Scientific and practical development of the agro-industrial complex and the production of healthy food products. Proceedings of the International scientific and practical conference dedicated to the anniversary of Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation Doctor of Engineering, Professor N.B. Gavrilo*. Omsk: Omsk State Agrarian University. 2025; 38–42 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/lryjwd>
4. Temerbaeva M.V., Gavrilo N.B., Rebezov M.B. Development of biotechnology of dairy product for nutrition of diabetics. *Current state and prospects for development of the agro-industrial complex and production of specialized food products. Proceedings of the International scientific and practical conference dedicated to the anniversary of Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation Doctor of Engineering, Professor N.B. Gavrilo*. Omsk: Omsk State Agrarian University. 2020; 520–527 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/ndipln>

5. Павлова Я.С., Харина П.Д. Полезные свойства коровьего молока. Приоритетные направления развития аграрной науки и технологий. *Сборник тезисов научно-практической конференции, посвященной 75-летию факультета биотехнологии и пищевой инженерии*. Екатеринбург: Уральский государственный аграрный университет. 2024; 2: 589–591. <https://www.elibrary.ru/rmjpupe>
6. Smolnikova F. et al. Developing milk-fruit drinks for school nutrition. *Journal of Natural Remedies*. 2021; 21(9-1): 72–77. <https://www.elibrary.ru/fwcshs>
7. Белооков А.А., Белоокова О.В., Горелик О.В., Ребезов М.Б. Состав и свойства молока коров черно-пестрой породы разных генотипов. *Аграрная наука*. 2023; (3): 62–69. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-368-3-62-69>
8. Temerbaeva M. et al. Technology of Sour Milk Product For Elderly Nutrition. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2018; 9(1): 291–295. <https://www.elibrary.ru/xnjgkt>
9. Иванникова Е.В., Дудинская Е.Н., Ткачева О.Н. Вопросы питания и нутритивной поддержки при остеопорозе. *Российский журнал гериатрической медицины*. 2023; (2): 92–104. <https://doi.org/10.37586/2686-8636-2-2023-92-104>
10. Епураш С.Д. Молочные белки. Польза молочных продуктов. Кузбасс: образование, наука, инновации. *Материалы XII Инновационной конференции*. Кемерово: Кемеровский государственный университет. 2024; 199–200. <https://www.elibrary.ru/axolun>
11. Смольникова Ф.Х., Наурзбаева Г.К., Асенова Б.К., Ребезов М.Б. Использование вторичных молочных продуктов пахты и сыворотки. Развитие биотехнологии: новая реальность. *Сборник Международной научно-практической конференции, приуроченной к 100-летию юбилею почетного ректора НГАУ профессора, доктора сельскохозяйственных наук И.И. Гудилина*. Новосибирск: Золотой колос. 2022; 154–159. <https://www.elibrary.ru/fdixfh>
12. Temerbaeva M. et al. Using of Creamy Bioadditives in the Production of Melted Cheese. *International Journal of Engineering and Technology*. 2018; 7(4.38): 1240–1242. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.38.27796>
13. Нарузбаева Г.К., Смольникова Ф.Х., Ребезов М.Б. Совершенствование технологии сливочного масла. Наука, образование и инновации для АПК: состояние, проблемы и перспективы. *Материалы VI Международной научно-практической онлайн-конференции*. Майкоп: Магарин О.Г. 2020; 513–515. <https://www.elibrary.ru/ulejxf>
14. Смольникова Ф.Х., Наурзбаева Г.К., Ребезов М.Б., Окусханова Э.К., Кулшатаева Б.М. Исследование пищевой безопасности сливочного масла с растительными компонентами. *Вестник Университета Шакарима. Серия: Технические науки*. 2024; (4): 190–199. [https://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-4\(16\)-25](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-4(16)-25)
15. Расулов У.И., Боймуратова Х.Ш., Солиева И. Молоко — продукт с высокой пищевой ценностью (анализ литературных данных). *Молодые ученые — науке и практике АПК. Материалы Международной научно-практической конференции аспирантов и молодых ученых*. Витебск: Витебская государственная академия ветеринарной медицины. 2024; 385–388. <https://www.elibrary.ru/hrjvaa>
16. Зобнина И.Н., Чепуштанова О.В. Физико-химические показатели овечьего молока. *Современные технологии птицеводства и мелкого животноводства. Сборник материалов круглого стола*. Екатеринбург: Уральский государственный аграрный университет. 2023; 1: 191–192. <https://www.elibrary.ru/wsucpq>
17. Temerbaeva M. et al. Development of Yoghurt from Combination of Goat and Cow Milk. *Annual Research & Review in Biology*. 2018; 23(6): 38800. <https://doi.org/10.9734/ARRB/2018/38800>
18. Темербаева М.В., Бестиева М.С., Урюмцева Т.И., Ребезов М.Б. Разработка технологии фруктовых десертов с бифидогенными свойствами на основе козьего молока. *Вестник Алматинского технологического университета*. 2019; (3): 56–59. <https://www.elibrary.ru/rchhlw>
19. Темербаева М.В., Бестиева М.С., Урюмцева Т.И., Ребезов М.Б. Методология проведения исследований при разработке десертов на основе козьего молока. *Вестник Алматинского технологического университета*. 2019; (4): 16–19. <https://www.elibrary.ru/anscah>
20. Темербаева М.В., Ребезов М.Б. Разработка технологии кисломолочного продукта на основе козьего молока для питания беременных и кормящих женщин. *Научные инновации — аграрному производству. Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию юбилею Омского ГАУ*. Омск: Омский государственный аграрный университет. 2018; 1436–1440. <https://www.elibrary.ru/xmoqlz>
5. Pavlova Ya.S., Kharina P.D. Useful properties of cow's milk. *Priority directions for the development of agricultural science and technology. Collection of abstracts of the scientific and practical conference dedicated to the 75th anniversary of the Faculty of Biotechnology and Food Engineering*. Yekaterinburg: Ural State Agrarian University. 2024; 2: 589–591 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/rmjpupe>
6. Smolnikova F. et al. Developing milk-fruit drinks for school nutrition. *Journal of Natural Remedies*. 2021; 21(9-1): 72–77. <https://www.elibrary.ru/fwcshs>
7. Belookov A.A., Belookova O.V., Gorelik O.V., Rebezov M.B. The composition and properties of the milk of black-and-white cows of different genotypes. *Agrarian science*. 2023; (3): 62–69 (In Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-368-3-62-69>
8. Temerbayeva M. et al. Technology of Sour Milk Product For Elderly Nutrition. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2018; 9(1): 291–295. <https://www.elibrary.ru/xnjgkt>
9. Ivannikova E.V., Dudinskaya E.N., Tkacheva O.N. Nutrients and Dietary Patterns for Osteoporosis. *Russian Journal of Geriatric Medicine*. 2023; (2): 92–104 (In Russian). <https://doi.org/10.37586/2686-8636-2-2023-92-104>
10. Epurash S.D. Milk proteins. The benefits of dairy products. *Kuzbass: education, science, innovation. Proceedings of the XII Innovation Convention*. Kemerovo: Kemerovo State University. 2024; 199–200 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/axolun>
11. Smolnikova F.Kh., Naurzbaeva G.K., Asenova B.K., Rebezov M.B. Use of secondary dairy products buttermilk and whey. *Biotechnology development: a new reality. Proceedings of the International scientific and practical conference dedicated to the 100th anniversary of the Honorary Rector of NSAU, Professor Doctor of Agricultural Sciences I.I. Gudilin*. Novosibirsk: Zolotoy kolos. 2022; 154–159 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/fdixfh>
12. Temerbaeva M. et al. Using of Creamy Bioadditives in the Production of Melted Cheese. *International Journal of Engineering and Technology*. 2018; 7(4.38): 1240–1242. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.38.27796>
13. Naruzbayeva G.K., Smolnikova F.Kh., Rebezov M.B. Improving butter technology. *Science, education and innovation for the agro-industrial complex: status, problems and prospects. Proceedings of the VI International scientific and practical online conference*. Maykop: Magarin O.G. 2020; 513–515 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/ulejxf>
14. Smolnikova F.H., Naurzbaeva G.K., Rebezov M.B., Okuskhanova E.K., Kulushtaeva B.M. Investigation of the food safety of butter with vegetable components. *Bulletin of Shakarim University. Series: Technical Sciences*. 2024; (4): 190–199 (In Russian). [https://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-4\(16\)-25](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-4(16)-25)
15. Rasulov U.I., Boymuratova Kh.Sh., Solieva I. Milk is a product with high nutritional value (analysis of literary data). *Young scientists — for science and practice of the agro-industrial complex. Proceedings of the International scientific and practical conference of postgraduate students and young scientists*. Vitebsk: Vitebsk State Academy of Veterinary Medicine. 2024; 385–388 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/hrjvaa>
16. Zobnina I.N., Chepushtanova O.V. Physicochemical parameters of sheep milk. *Modern technologies of poultry farming and small-scale livestock farming. Collection of materials from a round table*. Yekaterinburg: Ural State Agrarian University. 2023; 1: 191–192 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/wsucpq>
17. Temerbaeva M. et al. Development of Yoghurt from Combination of Goat and Cow Milk. *Annual Research & Review in Biology*. 2018; 23(6): 38800. <https://doi.org/10.9734/ARRB/2018/38800>
18. Temerbaeva M.V., Bestieva M.S., Uryumtseva T.I., Rebezov M.B. Development of fruit dessert technology with bifidogenic properties based on goat's milk. *The Journal of Almaty Technological University*. 2019; (3): 56–59 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/rchhlw>
19. Temerbaeva M.V., Bestieva M.S., Uryumtseva T.I., Rebezov M.B. Research methodology in the development of desserts based on goat milk. *The Journal of Almaty Technological University*. 2019; (4): 16–19 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/anscah>
20. Temerbaeva M.V., Rebezov M.B. Development of technology of fermented milk product based on goat milk for nutrition pregnant and lactating women. *Scientific innovations for agricultural production. Proceedings of the International scientific and practical conference dedicated to the 100th anniversary of Omsk State Agrarian University*. Omsk: Omsk State Agrarian University. 2018; 1436–1440 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/xmoqlz>

21. Горелик А.С., Горелик О.В., Ребезов М.Б., Харлап С.Ю. Динамика молочной продуктивности коров голштинской породы в зависимости от возраста в лактации. *Вестник Ошского государственного университета. Сельское хозяйство: агрономия, ветеринария и зоотехния*. 2025; (1): 146–157. <https://www.elibrary.ru/wmyenz>
22. Ребезов М.Б., Наумова Н.Л., Альхамова Г.К., Кожевникова Е.Ю., Сорокин А.В. Конъюнктура предложения обогащенных молочных продуктов на примере Челябинска. *Молочная промышленность*. 2011; (8): 38–39. <https://www.elibrary.ru/nygqsr>
23. Калибеккызы Ж., Жакупбекова Ш.К., Ребезов М.Б., Смольникова Ф.Х., Майжанова А.О. Исследование качественных характеристик, показателей пищевой безопасности цельного молока, используемого для производства курта. *Вестник Университета Шакарима. Серия: Технические науки*. 2025; (1): 312–321. [https://doi.org/10.1016/10.53360/2788-7995-2025-1\(17\)-40](https://doi.org/10.1016/10.53360/2788-7995-2025-1(17)-40)
24. Gavrilova N. *et al.* Development of specialized food products for nutrition of sportsmen. *Journal of Critical Reviews*. 2020; 7(4): 233–236. <https://www.elibrary.ru/rhzigio>
25. Gavrilova N. *et al.* Advanced Biotechnology of Specialized Fermented Milk Products. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2019; 8(2): 2718–2722. <https://doi.org/10.35940/ijrte.B3158.078219>
26. Gavrilova N. *et al.* Biotechnology application in production of specialized dairy products using probiotic cultures immobilization. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 2019; 8(6): 642–648. <https://www.elibrary.ru/pydnoh>
27. Chernopolskaya N. *et al.* Biotechnology of specialized fermented product for elderly nutrition. *International Journal of Pharmaceutical Research*. 2019; 11(1): 545–550. <https://www.elibrary.ru/jqfiot>
28. Chernopolskaya N. *et al.* Biotechnology of specialized product for sports nutrition. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2019; 8(4): 40–45. <https://www.elibrary.ru/strlxl>
29. Сапожникова О.О., Улыбина Л.В. Конъюнктура мирового рынка молочной продукции. Молодежь и инновации. Материалы XXI Всероссийской (национальной) научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Чебоксары: Чувашский государственный аграрный университет. 2025; 445–447. <https://www.elibrary.ru/jsvarb>
30. Pereira P.C. Milk nutritional composition and its role in human health. *Nutrition*. 2014; 30(6): 619–627. <https://doi.org/10.1016/J.NUT.2013.10.011>
31. Опополь Н.И., Сырку Р.Ф., Пынзару Ю.В., Богдевич О.П., Кадочников О.П. Гигиеническая оценка содержания полициклических ароматических углеводородов в продуктах питания и их поступления в организм населения. *Гигиена и санитария*. 2015; 94(4): 52–56. <https://www.elibrary.ru/uhkwbj>
32. Фрумин Г.Т. Прогресс химии и экологии. Часть II. Полициклические ароматические углеводороды и другие загрязняющие вещества. *Экологическая химия*. 2024; 33(5): 233–240. <https://www.elibrary.ru/rjhjae>
33. Cuesta-Triana F., Verdejo-Bravo C., Fernández-Pérez C., Martín-Sánchez F.J. Effect of Milk and Other Dairy Products on the Risk of Frailty, Sarcopenia, and Cognitive Performance Decline in the Elderly: A Systematic Review. *Advances in Nutrition*. 2019; 10(S2): S105–S119. <https://doi.org/10.1093/advances/nmy105>
34. Zanini B., Simonetto A., Zubani M., Castellano M., Gilioli G. The Effects of Cow-Milk Protein Supplementation in Elderly Population: Systematic Review and Narrative Synthesis. *Nutrients*. 2020; 12(9): 2548. <https://doi.org/10.3390/nu12092548>
35. Kuramshina N. *et al.* Heavy metals content in meat and milk of Orenburg region of Russia. *International Journal of Pharmaceutical Research*. 2019; 11(1): 1031–1035. <https://www.elibrary.ru/zsxhdf>
36. Лаврушина Е.Е., Ребезов М.Б., Топурия Г.М., Топурия Л.Ю., Ступина М.Ю. Гигиеническая оценка молока коз по содержанию радионуклидов. Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства. Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, посвященный памяти заслуженного работника Высшей школы РФ, почетного работника высшего профессионального образования РФ, почетного профессора Брянской ГСХА, почетного гражданина Брянской области доктора биологических наук, профессора Е.П. Ващекина. Брянск: Брянский государственный аграрный университет. 2025; 115–119. <https://www.elibrary.ru/blilde>
21. Gorelik A.S., Gorelik O.V., Rebezov M.B., Kharlap S.Yu. Dynamics of milk productivity of Holstein cows depending on age in lactations. *Journal of Osh State University. Agriculture: Agronomy, Veterinary and Zootechnics*. 2025; (1): 146–157 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/wmyenz>
22. Rebezov M.B., Naumova N.L., Alhamova G.K., Kozhevnikova E.Yu., Sorokin A.V. Offers of the enriched milk products in Chelyabinsk. *Dairy industry*. 2011; (8): 38–39 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/nygqsr>
23. Kalibekkyzy Zh., Zhakupbekova Sh.K., Rebezov M.B., Smolnikova F.H., Maizhanova A.O. Research of qualitative characteristics, indicators of food safety of whole milk used for the production of kurt. *Bulletin of Shakarim University. Series: Technical Sciences*. 2025; (1): 312–321 (In Russian). [https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-1\(17\)-40](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-1(17)-40)
24. Gavrilova N. *et al.* Development of specialized food products for nutrition of sportsmen. *Journal of Critical Reviews*. 2020; 7(4): 233–236. <https://www.elibrary.ru/rhzigio>
25. Gavrilova N. *et al.* Advanced Biotechnology of Specialized Fermented Milk Products. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2019; 8(2): 2718–2722. <https://doi.org/10.35940/ijrte.B3158.078219>
26. Gavrilova N. *et al.* Biotechnology application in production of specialized dairy products using probiotic cultures immobilization. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 2019; 8(6): 642–648. <https://www.elibrary.ru/pydnoh>
27. Chernopolskaya N. *et al.* Biotechnology of specialized fermented product for elderly nutrition. *International Journal of Pharmaceutical Research*. 2019; 11(1): 545–550. <https://www.elibrary.ru/jqfiot>
28. Chernopolskaya N. *et al.* Biotechnology of specialized product for sports nutrition. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2019; 8(4): 40–45. <https://www.elibrary.ru/strlxl>
29. Sapozhnikova O.O., Ulybina L.V. World dairy products market conjuncture. *Youth and Innovation. Proceedings of the XXI All-Russian (national) scientific and practical conference of young scientists, postgraduates, and students*. Cheboksary: Chuvash State Agrarian University. 2025; 445–447 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/jsvarb>
30. Pereira P.C. Milk nutritional composition and its role in human health. *Nutrition*. 2014; 30(6): 619–627. <https://doi.org/10.1016/J.NUT.2013.10.011>
31. Opopol N.I., Syрку R.F., Pynzaru Yu.V., Bogdevich O.P., Kadochnikov O.P. Hygienic assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons content and estimation of their intake with food by the population. *Hygiene and Sanitation*. 2015; 94(4): 52–56 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/uhkwbj>
32. Frumin G.T. Progress of chemistry and ecology. Part II. Polycyclic aromatic hydrocarbons and other pollutants. *Ekologicheskaya khimiya*. 2024; 33(5): 233–240 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/rjhjae>
33. Cuesta-Triana F., Verdejo-Bravo C., Fernández-Pérez C., Martín-Sánchez F.J. Effect of Milk and Other Dairy Products on the Risk of Frailty, Sarcopenia, and Cognitive Performance Decline in the Elderly: A Systematic Review. *Advances in Nutrition*. 2019; 10(S2): S105–S119. <https://doi.org/10.1093/advances/nmy105>
34. Zanini B., Simonetto A., Zubani M., Castellano M., Gilioli G. The Effects of Cow-Milk Protein Supplementation in Elderly Population: Systematic Review and Narrative Synthesis. *Nutrients*. 2020; 12(9): 2548. <https://doi.org/10.3390/nu12092548>
35. Kuramshina N. *et al.* Heavy metals content in meat and milk of Orenburg region of Russia. *International Journal of Pharmaceutical Research*. 2019; 11(1): 1031–1035. <https://www.elibrary.ru/zsxhdf>
36. Lavrushina E.E., Rebezov M.B., Topuria G.M., Topuria L.Yu., Stupina M.Yu. Hygienic evaluation of goat milk by radionuclide content. *Actual problems of intensive development of animal husbandry. Collection of scientific papers of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the memory of the Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Honorary Professor of the Bryansk State Agricultural Academy, Honorary citizen of the Bryansk region, Doctor of Biological Sciences, Professor E.P. Vashchekina*. Bryansk: Bryansk State Agrarian University. 2025; 115–119 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/blilde>

37. Смольникова Ф.Х., Ребезов М.Б., Исакова З.И. Пищевая безопасность национальных молочных продуктов. *Продовольственная безопасность и импортозамещение в условиях современного социально-экономического развития России. Материалы Международной научно-практической конференции*. Коломна: Московский государственный областной социально-гуманитарный институт. 2015; 86–90. <https://www.elibrary.ru/zalygd>
38. Суесинова Ж.А. Проблемы метрологического обеспечения качества и безопасности молока и молочной продукции. *Россия — Евразия — мир: интеграция — развитие — перспектива. Материалы XIV Евразийского экономического форума молодежи*. Екатеринбург: Уральский государственный экономический университет. 2024; 3: 99–101. <https://www.elibrary.ru/iervkn>
39. Чупракова А.М., Ребезов М.Б. Анализ результатов проб молока и молочных продуктов, хлебобулочных и кондитерских изделий на содержание токсичных элементов. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии*. 2016; 4(1): 47–54. <https://doi.org/10.14529/food160106>
40. Ogori A.F., Girgih A.T., Abu J.O., Eke M.O. Food Derived Bioactive Peptides for Health Enhancement and Management of Some Chronic Diseases. *Asian Food Science Journal*. 2019; 8(1): 1–11. <https://doi.org/10.9734/afsj/2019/v8i129981>
41. Żbik K., Onopiuk A., Górski-Horczyzak E., Wierzbicka A. Trends and Opportunities in the Dairy Industry: A2 Milk and Processing Methods. *Applied Sciences*. 2024; 14(15): 6513. <https://doi.org/10.3390/app14156513>
42. Wang C., Wang X., Yuan X., Ren J., Gong P. Organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in air, grass and yak butter from Namco in the central Tibetan Plateau. *Environmental Pollution*. 2015; 201: 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.02.037>
43. Balthazar C.F. et al. Sheep Milk: Physicochemical Characteristics and Relevance for Functional Food Development. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2017; 16(2): 247–262. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12250>
44. Lad S.S., Aparnathi K.D., Mehta B., Velpula S. Goat Milk in Human Nutrition and Health — A Review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2017; 6(5): 1781–1792. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.605.194>
45. Venkatraman G. et al. Environmental impact and human health effects of polycyclic aromatic hydrocarbons and remedial strategies: A detailed review. *Chemosphere*. 2024; 351: 141227. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141227>
46. Domingo J.L., Nadal M. Human dietary exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons: A review of the scientific literature. *Food and Chemical Toxicology*. 2015; 86: 144–153. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2015.10.002>
47. Ellickson K.M., Herbrandson C., Krause M.J., Pratt G.C., Kellock K.A. Comparative risk estimates of an expanded list of PAHs from community and source-influenced air sampling. *Chemosphere*. 2020; 253: 126680. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126680>
48. Cai C., Wu P., Zhou P., Yang D., Hu Z. Detection, Risk Assessment, and Survey of Four Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Markers in Infant Formula Powder. *Journal of Food Quality*. 2020; 2020: 2959532. <https://doi.org/10.1155/2020/2959532>
49. Amirdivani S. et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in milk and dairy products. *International Journal of Dairy Technology*. 2019; 72(1): 120–131. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12567>
50. Yebra-Pimentel I., Fernández-González R., Martínez Carballo E., Simal-Gándara J. Searching ingredients polluted by polycyclic aromatic hydrocarbons in feeds due to atmospheric or pyrolytic sources. *Food Chemistry*. 2012; 135(3): 2043–2051. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.06.069>
51. Ge Y., Wu S., Yan K. Concentrations, influencing factors, risk assessment methods, health hazards and analyses of polycyclic aromatic hydrocarbons in dairies: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2023; 63(23): 6168–6181. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2028717>
52. Rengarajan T., Rajendran P., Nandakumar N., Lokeshkumar B., Rajendran P., Nishigaki I. Exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons with special focus on cancer. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*. 2015; 5(3): 182–189. [https://doi.org/10.1016/S2221-1691\(15\)30003-4](https://doi.org/10.1016/S2221-1691(15)30003-4)
53. Shoaef F., Talebi-Ghane E., Amirsadeghi S., Mehri F. The investigation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in milk and its products: A global systematic review, meta-analysis and health risk assessment. *International Dairy Journal*. 2023; 142: 105645. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2023.105645>
37. Smolnikova F.Kh., Rebezov M.B., Isakova Z.I. Food safety of national dairy products. *Food security and import substitution in the context of modern socio-economic development of Russia. Proceedings of the International scientific and practical conference*. Kolomna: Moscow State Regional Social and Humanitarian Institute. 2015; 86–90 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/zalygd>
38. Suesinova Zh.A. Problems of metrological assurance of quality and safety of milk and dairy products. *Russia — Eurasia — the world: integration — development — prospect. Proceedings of the XIV Eurasian Economic Youth Forum*. Yekaterinburg: Ural State University of Economics. 2024; 3: 99–101 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/iervkn>
39. Chuprakova A.M., Rebezov M.B. Analysis of the results of the samples of milk and dairy products, as well as bakery and confectionery products on the content of toxic elements. *Bulletin of South Ural State University. Series: Food and Biotechnology*. 2016; 4(1): 47–54 (In Russian). <https://doi.org/10.14529/food160106>
40. Ogori A.F., Girgih A.T., Abu J.O., Eke M.O. Food Derived Bioactive Peptides for Health Enhancement and Management of Some Chronic Diseases. *Asian Food Science Journal*. 2019; 8(1): 1–11. <https://doi.org/10.9734/afsj/2019/v8i129981>
41. Żbik K., Onopiuk A., Górski-Horczyzak E., Wierzbicka A. Trends and Opportunities in the Dairy Industry: A2 Milk and Processing Methods. *Applied Sciences*. 2024; 14(15): 6513. <https://doi.org/10.3390/app14156513>
42. Wang C., Wang X., Yuan X., Ren J., Gong P. Organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in air, grass and yak butter from Namco in the central Tibetan Plateau. *Environmental Pollution*. 2015; 201: 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.02.037>
43. Balthazar C.F. et al. Sheep Milk: Physicochemical Characteristics and Relevance for Functional Food Development. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2017; 16(2): 247–262. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12250>
44. Lad S.S., Aparnathi K.D., Mehta B., Velpula S. Goat Milk in Human Nutrition and Health — A Review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2017; 6(5): 1781–1792. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.605.194>
45. Venkatraman G. et al. Environmental impact and human health effects of polycyclic aromatic hydrocarbons and remedial strategies: A detailed review. *Chemosphere*. 2024; 351: 141227. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141227>
46. Domingo J.L., Nadal M. Human dietary exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons: A review of the scientific literature. *Food and Chemical Toxicology*. 2015; 86: 144–153. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2015.10.002>
47. Ellickson K.M., Herbrandson C., Krause M.J., Pratt G.C., Kellock K.A. Comparative risk estimates of an expanded list of PAHs from community and source-influenced air sampling. *Chemosphere*. 2020; 253: 126680. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126680>
48. Cai C., Wu P., Zhou P., Yang D., Hu Z. Detection, Risk Assessment, and Survey of Four Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Markers in Infant Formula Powder. *Journal of Food Quality*. 2020; 2020: 2959532. <https://doi.org/10.1155/2020/2959532>
49. Amirdivani S. et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in milk and dairy products. *International Journal of Dairy Technology*. 2019; 72(1): 120–131. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12567>
50. Yebra-Pimentel I., Fernández-González R., Martínez Carballo E., Simal-Gándara J. Searching ingredients polluted by polycyclic aromatic hydrocarbons in feeds due to atmospheric or pyrolytic sources. *Food Chemistry*. 2012; 135(3): 2043–2051. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.06.069>
51. Ge Y., Wu S., Yan K. Concentrations, influencing factors, risk assessment methods, health hazards and analyses of polycyclic aromatic hydrocarbons in dairies: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2023; 63(23): 6168–6181. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2028717>
52. Rengarajan T., Rajendran P., Nandakumar N., Lokeshkumar B., Rajendran P., Nishigaki I. Exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons with special focus on cancer. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*. 2015; 5(3): 182–189. [https://doi.org/10.1016/S2221-1691\(15\)30003-4](https://doi.org/10.1016/S2221-1691(15)30003-4)
53. Shoaef F., Talebi-Ghane E., Amirsadeghi S., Mehri F. The investigation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in milk and its products: A global systematic review, meta-analysis and health risk assessment. *International Dairy Journal*. 2023; 142: 105645. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2023.105645>

54. Chen B.-H., Inbaraj B.S., Hsu K.-C. Recent advances in the analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in food and water. *Journal of Food and Drug Analysis*. 2022; 30(4): 494–522. <https://doi.org/10.38212/2224-6614.3429>
55. Mogashane T.M., Mokoena L., Tshilongo J. A Review on Recent Developments in the Extraction and Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Environmental Samples. *Water*. 2024; 16(17): 2520. <https://doi.org/10.3390/w16172520>
56. Soursou V., Campo J., Picó Y. Revisiting the analytical determination of PAHs in environmental samples: An update on recent advances. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*. 2023; 37: e00195. <https://doi.org/10.1016/j.teac.2023.e00195>
57. Liu L., Chen X., Duan Y., Wu Z., Xu L. Distribution, sources and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soils under different landform conditions of Taiyuan, China. *Frontiers in Environmental Science*. 2024; 12: 1363297. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1363297>
58. Sahoo B.M., Kumar B.V.V.R., Banik B.K., Borah P. Polyaromatic Hydrocarbons (PAHs): Structures, Synthesis and Their Biological Profile. *Current Organic Synthesis*. 2020; 17(8): 625–640. <https://doi.org/10.2174/1570179417666200713182441>
59. Santonicola S., Albrizio S., Murru N., Ferrante M.C., Mercogliano R. Study on the occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons in milk and meat/fish based baby food available in Italy. *Chemosphere*. 2017; 184: 467–472. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.017>
60. Chatzimichail S., Rahimi F., Saifuddin A., Surman A.J., Taylor-Robinson S.D., Salehi-Reyhani A. Hand-portable HPLC with broadband spectral detection enables analysis of complex polycyclic aromatic hydrocarbon mixtures. *Communications Chemistry*. 2021; 4: 17. <https://doi.org/10.1038/s42004-021-00457-7>
61. Liu T., Zhang L., Pan L., Yang D. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons' Impact on Crops and Occurrence, Sources, and Detection Methods in Food: A Review. *Foods*. 2024; 13(13): 1977. <https://doi.org/10.3390/foods13131977>
62. Sampaio G.R. et al. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Foods: Biological Effects, Legislation, Occurrence, Analytical Methods, and Strategies to Reduce Their Formation. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021; 22(11): 6010. <https://doi.org/10.3390/ijms22116010>
63. Islam F. et al. Natural Small Molecules in Gastrointestinal Tract and Associated Cancers: Molecular Insights and Targeted Therapies. *Molecules*. 2022; 27(17): 5686. <https://doi.org/10.3390/molecules27175686>
64. Korsh J., Shen A., Aliano K., Davenport T. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Breast Cancer: A Review of the Literature. *Breast Care*. 2015; 10(5): 316–318. <https://doi.org/10.1159/000436956>
65. Mallah M.A. et al. Polycyclic aromatic hydrocarbon and its effects on human health: An overview. *Chemosphere*. 2022; 296: 133948. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133948>
66. Bodduluru L.N., Kasala E.R., Barua C.C., Karnam K.C., Dahiya V., Ellutla M. Antiproliferative and antioxidant potential of hesperetin against benzo(a)pyrene-induced lung carcinogenesis in Swiss albino mice. *Chemico-Biological Interactions*. 2015; 242: 345–352. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2015.10.020>
67. Singh T.P., Arora S., Sarkar M. Yak milk and milk products: Functional, bioactive constituents and therapeutic potential. *International Dairy Journal*. 2023; 142: 105637. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2023.105637>
68. Chalupa-Krebzdak S., Long C.J., Bohrer B.M. Nutrient density and nutritional value of milk and plant-based milk alternatives. *International Dairy Journal*. 2018; 87: 84–92. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2018.07.018>
69. Gil Á., Ortega R.M. Introduction and Executive Summary of the Supplement, Role of Milk and Dairy Products in Health and Prevention of Noncommunicable Chronic Diseases: A Series of Systematic Reviews. *Advances in Nutrition*. 2019; 10(S2): S67–S73. <https://doi.org/10.1093/advances/nmz020>
70. Hu C. et al. Association of polycyclic aromatic hydrocarbons exposure with atherosclerotic cardiovascular disease risk: A role of mean platelet volume or club cell secretory protein. *Environmental Pollution*. 2018; 233: 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.10.042>
71. Wei R., Yang M., Yao C., Chen W., Yang L., Ni J. Characteristics and Biodegradation of Nonextractable Residues of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Historically Polluted Soils. *Water Air and Soil Pollution*. 2024; 235(5): 300. <https://doi.org/10.1007/s11270-024-07115-3>
54. Chen B.-H., Inbaraj B.S., Hsu K.-C. Recent advances in the analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in food and water. *Journal of Food and Drug Analysis*. 2022; 30(4): 494–522. <https://doi.org/10.38212/2224-6614.3429>
55. Mogashane T.M., Mokoena L., Tshilongo J. A Review on Recent Developments in the Extraction and Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Environmental Samples. *Water*. 2024; 16(17): 2520. <https://doi.org/10.3390/w16172520>
56. Soursou V., Campo J., Picó Y. Revisiting the analytical determination of PAHs in environmental samples: An update on recent advances. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*. 2023; 37: e00195. <https://doi.org/10.1016/j.teac.2023.e00195>
57. Liu L., Chen X., Duan Y., Wu Z., Xu L. Distribution, sources and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soils under different landform conditions of Taiyuan, China. *Frontiers in Environmental Science*. 2024; 12: 1363297. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1363297>
58. Sahoo B.M., Kumar B.V.V.R., Banik B.K., Borah P. Polyaromatic Hydrocarbons (PAHs): Structures, Synthesis and Their Biological Profile. *Current Organic Synthesis*. 2020; 17(8): 625–640. <https://doi.org/10.2174/1570179417666200713182441>
59. Santonicola S., Albrizio S., Murru N., Ferrante M.C., Mercogliano R. Study on the occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons in milk and meat/fish based baby food available in Italy. *Chemosphere*. 2017; 184: 467–472. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.017>
60. Chatzimichail S., Rahimi F., Saifuddin A., Surman A.J., Taylor-Robinson S.D., Salehi-Reyhani A. Hand-portable HPLC with broadband spectral detection enables analysis of complex polycyclic aromatic hydrocarbon mixtures. *Communications Chemistry*. 2021; 4: 17. <https://doi.org/10.1038/s42004-021-00457-7>
61. Liu T., Zhang L., Pan L., Yang D. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons' Impact on Crops and Occurrence, Sources, and Detection Methods in Food: A Review. *Foods*. 2024; 13(13): 1977. <https://doi.org/10.3390/foods13131977>
62. Sampaio G.R. et al. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Foods: Biological Effects, Legislation, Occurrence, Analytical Methods, and Strategies to Reduce Their Formation. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021; 22(11): 6010. <https://doi.org/10.3390/ijms22116010>
63. Islam F. et al. Natural Small Molecules in Gastrointestinal Tract and Associated Cancers: Molecular Insights and Targeted Therapies. *Molecules*. 2022; 27(17): 5686. <https://doi.org/10.3390/molecules27175686>
64. Korsh J., Shen A., Aliano K., Davenport T. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Breast Cancer: A Review of the Literature. *Breast Care*. 2015; 10(5): 316–318. <https://doi.org/10.1159/000436956>
65. Mallah M.A. et al. Polycyclic aromatic hydrocarbon and its effects on human health: An overview. *Chemosphere*. 2022; 296: 133948. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133948>
66. Bodduluru L.N., Kasala E.R., Barua C.C., Karnam K.C., Dahiya V., Ellutla M. Antiproliferative and antioxidant potential of hesperetin against benzo(a)pyrene-induced lung carcinogenesis in Swiss albino mice. *Chemico-Biological Interactions*. 2015; 242: 345–352. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2015.10.020>
67. Singh T.P., Arora S., Sarkar M. Yak milk and milk products: Functional, bioactive constituents and therapeutic potential. *International Dairy Journal*. 2023; 142: 105637. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2023.105637>
68. Chalupa-Krebzdak S., Long C.J., Bohrer B.M. Nutrient density and nutritional value of milk and plant-based milk alternatives. *International Dairy Journal*. 2018; 87: 84–92. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2018.07.018>
69. Gil Á., Ortega R.M. Introduction and Executive Summary of the Supplement, Role of Milk and Dairy Products in Health and Prevention of Noncommunicable Chronic Diseases: A Series of Systematic Reviews. *Advances in Nutrition*. 2019; 10(S2): S67–S73. <https://doi.org/10.1093/advances/nmz020>
70. Hu C. et al. Association of polycyclic aromatic hydrocarbons exposure with atherosclerotic cardiovascular disease risk: A role of mean platelet volume or club cell secretory protein. *Environmental Pollution*. 2018; 233: 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.10.042>
71. Wei R., Yang M., Yao C., Chen W., Yang L., Ni J. Characteristics and Biodegradation of Nonextractable Residues of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Historically Polluted Soils. *Water Air and Soil Pollution*. 2024; 235(5): 300. <https://doi.org/10.1007/s11270-024-07115-3>

72. Wang Z., Ng K., Warner R.D., Stockmann R., Fang Z. Reduction strategies for polycyclic aromatic hydrocarbons in processed foods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2022; 21(2): 1598–1626. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12905>
73. Hamidi E.N., Hajeb P., Selamat J., Razis A.F.A. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and their Bioaccessibility in Meat: a Tool for Assessing Human Cancer Risk. *Asian Pacific Journal of Cancer Prevention*. 2016; 17(1): 15–23. <http://doi.org/10.7314/APJCP.2016.17.1.15>
74. Onopiuk A., Kołodziejczak K., Szpicer A., Wojtasik-Kalinowska I., Wierzbicka A., Półtorak A. Analysis of factors that influence the PAH profile and amount in meat products subjected to thermal processing. *Trends in Food Science and Technology*. 2021; 115: 366–379. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.06.043>
75. Chen B.H., Chen Y.C. Formation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Smoke from Heated Model Lipids and Food Lipids. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2001; 49(11): 5238–5243. <https://doi.org/10.1021/jf0106906>
76. Maciejczyk M., Tyrpień-Golder K., Janoszka B., Gierat B., Muzyka R. Mutagenic and carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in food — occurrence, human health effects, and assessment methods of exposure. *Environmental Medicine*. 2023; 26(1–2): 8–15. <https://doi.org/10.26444/ms/168971>
77. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Food. Scientific Opinion of the Panel on Contaminants in the Food Chain on a request from the European Commission on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Food: Question N°EFSA-Q-2007-136. EFSA Journal No. 724. *European Food Safety Authority*. 2008; 114.
78. Zelinkova Z., Wenzl T. The Occurrence of 16 EPA PAHs in Food — A Review. *Polycyclic Aromatic Compounds*. 2015; 35(2–4): 248–284. <https://doi.org/10.1080/10406638.2014.918550>
79. Majumder D., Sarkar C., Debnath R., Tribedi P., Maiti D. Mechanistic insight into the synergism of IL-27 and IL-28B in regulation of benzo(a)pyrene-induced lung carcinogenesis associated ROS/NF- κ B/NLRP3 crosstalk. *Chemico-Biological Interactions*. 2022; 354: 109807. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2022.109807>
80. Badibostan H. *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in infant formulae, follow-on formulae, and baby foods in Iran: An assessment of risk. *Food and Chemical Toxicology*. 2019; 131: 110640. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2019.110640>
81. Nie C. *et al.* Structure, Biological Functions, Separation, Properties, and Potential Applications of Milk Fat Globule Membrane (MFGM): A Review. *Nutrients*. 2024; 16(5): 587. <https://doi.org/10.3390/nu16050587>
82. Belo R.F.C., Pissinatti R., de Souza S.V.C., Junqueira R.G. Evaluating Matrix Effects in the Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Food: Can These Interferences Be Neglected for Isotope Dilution?. *Food Analytical Methods*. 2017; 10(5): 1488–1499. <https://doi.org/10.1007/s12161-016-0706-0>
83. Anselmo S., Sancataldo G., Foderà V., Vetri V. α -casein micelles-membranes interaction: Flower-like lipid protein coaggregates formation. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) — General Subjects*. 2022; 1866(10): 130196. <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2022.130196>
84. Palacios Colón L., Rascón A.J., Ballesteros E. Trace-Level Determination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Dairy Products Available in Spanish Supermarkets by Semi-Automated Solid-Phase Extraction and Gas Chromatography–Mass Spectrometry Detection. *Foods*. 2022; 11(5): 713. <https://doi.org/10.3390/foods11050713>
85. Alahmad W., Kaya S.I., Cetinkaya A., Varanusupakul P., Ozkan S.A. Green chemistry methods for food analysis: Overview of sample preparation and determination. *Advances in Sample Preparation*. 2023; 5: 100053. <https://doi.org/10.1016/j.sampre.2023.100053>
86. Jagirani M.S., Ozalp O., Soylak M. New Trend in the Extraction of Pesticides from the Environmental and Food Samples Applying Microextraction Based Green Chemistry Scenario: A Review. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*. 2022; 52(6): 1343–1369. <https://doi.org/10.1080/10408347.2021.1874867>
87. Galmiche M., Delhomme O., François Y.-N., Millet M. Environmental analysis of polar and non-polar Polycyclic Aromatic Compounds in airborne particulate matter, settled dust and soot: Part II: Instrumental analysis and occurrence. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2021; 134: 116146. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2020.116146>
72. Wang Z., Ng K., Warner R.D., Stockmann R., Fang Z. Reduction strategies for polycyclic aromatic hydrocarbons in processed foods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2022; 21(2): 1598–1626. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12905>
73. Hamidi E.N., Hajeb P., Selamat J., Razis A.F.A. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and their Bioaccessibility in Meat: a Tool for Assessing Human Cancer Risk. *Asian Pacific Journal of Cancer Prevention*. 2016; 17(1): 15–23. <http://doi.org/10.7314/APJCP.2016.17.1.15>
74. Onopiuk A. Analysis of Factors That Influence the PAH Profile and Amount in Meat Products Subjected to Thermal Processing. *Trends in Food Science and Technology*. 2021; 115: 366–379. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.06.043>
75. Chen B.H., Chen Y.C. Formation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Smoke from Heated Model Lipids and Food Lipids. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2001; 49(11): 5238–5243. <https://doi.org/10.1021/jf0106906>
76. Maciejczyk M., Tyrpień-Golder K., Janoszka B., Gierat B., Muzyka R. Mutagenic and carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in food — occurrence, human health effects, and assessment methods of exposure. *Environmental Medicine*. 2023; 26(1–2): 8–15. <https://doi.org/10.26444/ms/168971>
77. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Food. Scientific Opinion of the Panel on Contaminants in the Food Chain on a request from the European Commission on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Food: Question N°EFSA-Q-2007-136. EFSA Journal No. 724. *European Food Safety Authority*. 2008; 114.
78. Zelinkova Z., Wenzl T. The Occurrence of 16 EPA PAHs in Food — A Review. *Polycyclic Aromatic Compounds*. 2015; 35(2–4): 248–284. <https://doi.org/10.1080/10406638.2014.918550>
79. Majumder D., Sarkar C., Debnath R., Tribedi P., Maiti D. Mechanistic insight into the synergism of IL-27 and IL-28B in regulation of benzo(a)pyrene-induced lung carcinogenesis associated ROS/NF- κ B/NLRP3 crosstalk. *Chemico-Biological Interactions*. 2022; 354: 109807. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2022.109807>
80. Badibostan H. *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in infant formulae, follow-on formulae, and baby foods in Iran: An assessment of risk. *Food and Chemical Toxicology*. 2019; 131: 110640. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2019.110640>
81. Nie C. *et al.* Structure, Biological Functions, Separation, Properties, and Potential Applications of Milk Fat Globule Membrane (MFGM): A Review. *Nutrients*. 2024; 16(5): 587. <https://doi.org/10.3390/nu16050587>
82. Belo R.F.C., Pissinatti R., de Souza S.V.C., Junqueira R.G. Evaluating Matrix Effects in the Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Food: Can These Interferences Be Neglected for Isotope Dilution?. *Food Analytical Methods*. 2017; 10(5): 1488–1499. <https://doi.org/10.1007/s12161-016-0706-0>
83. Anselmo S., Sancataldo G., Foderà V., Vetri V. α -casein micelles-membranes interaction: Flower-like lipid protein coaggregates formation. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) — General Subjects*. 2022; 1866(10): 130196. <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2022.130196>
84. Palacios Colón L., Rascón A.J., Ballesteros E. Trace-Level Determination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Dairy Products Available in Spanish Supermarkets by Semi-Automated Solid-Phase Extraction and Gas Chromatography–Mass Spectrometry Detection. *Foods*. 2022; 11(5): 713. <https://doi.org/10.3390/foods11050713>
85. Alahmad W., Kaya S.I., Cetinkaya A., Varanusupakul P., Ozkan S.A. Green chemistry methods for food analysis: Overview of sample preparation and determination. *Advances in Sample Preparation*. 2023; 5: 100053. <https://doi.org/10.1016/j.sampre.2023.100053>
86. Jagirani M.S., Ozalp O., Soylak M. New Trend in the Extraction of Pesticides from the Environmental and Food Samples Applying Microextraction Based Green Chemistry Scenario: A Review. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*. 2022; 52(6): 1343–1369. <https://doi.org/10.1080/10408347.2021.1874867>
87. Galmiche M., Delhomme O., François Y.-N., Millet M. Environmental analysis of polar and non-polar Polycyclic Aromatic Compounds in airborne particulate matter, settled dust and soot: Part II: Instrumental analysis and occurrence. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2021; 134: 116146. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2020.116146>

88. Rawash E.-S.A., Mohamed G.G., Souaya E.R., Khalil L.H., El-Chaghaby G.A., El-Gammal M.H. Distribution and Health Hazards of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Egyptian Milk and Dairy-Based Products. *Beverages*. 2018; 4(3): 63. <https://doi.org/10.3390/beverages4030063>
89. Hasan G.M.M.A., Ali Shaikh M.A., Satter M.A., Hossain M.S. Detection of indicator polychlorinated biphenyls (I-PCBs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in cow milk from selected areas of Dhaka, Bangladesh and potential human health risks assessment. *Toxicology Reports*. 2022; 9: 1514–1522. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2022.07.008>
90. Rincón J.C. *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in four milk brands sold in Mexico City: evaluating three fat extraction methods. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*. 2019; 10(4): 1064–1076. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v10i4.4763>
91. Kishikawa N., Wada M., Kuroda N., Akiyama S., Nakashima K. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in milk samples by high-performance liquid chromatography with fluorescence detection. *Journal of Chromatography B*. 2003; 789(2): 257–264. [https://doi.org/10.1016/S1570-0232\(03\)00066-7](https://doi.org/10.1016/S1570-0232(03)00066-7)
92. Yan K., Wu S., Gong G., Xin L., Ge Y. Simultaneous Determination of Typical Chlorinated, Oxygenated, and European Union Priority Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Milk Samples and Milk Powders. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2021; 69(13): 3923–3931. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c00283>
93. Sun Y., Yan K., Wu S., Gong G. Occurrence, spatial distribution and impact factors of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons in milks from nine countries. *Food Control*. 2020; 113: 107197. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107197>
94. Aguinaga N., Campillo N., Viñas P., Hernández-Córdoba M. A headspace solid-phase microextraction procedure coupled with gas chromatography–mass spectrometry for the analysis of volatile polycyclic aromatic hydrocarbons in milk samples. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2008; 391(3): 753–758. <https://doi.org/10.1007/s00216-008-1841-2>
95. Girelli A.M., Sperati D., Tarola A.M. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in Italian milk by HPLC with fluorescence detection. *Food Additives & Contaminants: Part A*. 2014; 31(4): 703–710. <https://doi.org/10.1080/19440049.2013.878959>
96. Dobrinás S., Soceanu A., Popescu V., Coatu V. Polycyclic aromatic hydrocarbons and pesticides in milk powder. *Journal of Dairy Research*. 2016; 83(2): 261–265. <https://doi.org/10.1017/S0022029916000169>
97. Hollosi L., Wenzl T. Development and optimisation of a dopant assisted liquid chromatographic-atmospheric pressure photo ionisation-tandem mass spectrometric method for the determination of 15 + 1 EU priority PAHs in edible oils. *Journal of Chromatography A*. 2011; 1218(1): 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2010.10.015>
98. Hernández-Arteseros J.A., Beltrán J.L., Compañó R., Prat M.D. Fast-scanning fluorescence spectroscopy as a detection system in liquid chromatography for confirmatory analysis of flumequine and oxolinic acid. *Journal of Chromatography A*. 2002; 942(1–2): 275–281. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(01\)01359-0](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(01)01359-0)
99. Bertoz V., Purcaro G., Conchione C., Moret S. A Review on the Occurrence and Analytical Determination of PAHs in Olive Oils. *Foods*. 2021; 10(2): 324. <https://doi.org/10.3390/foods10020324>
100. Avagyan R., Nyström R., Boman C., Westerholm R. Determination of hydroxylated polycyclic aromatic hydrocarbons by HPLC-photoionization tandem mass spectrometry in wood smoke particles and soil samples. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2015; 407(16): 4523–4534. <https://doi.org/10.1007/s00216-015-8638-x>
101. Luque-Uría Á., Espinosa-Mansilla A., Durán-Merás I. Hplc-Fast Scanning Fluorimetric Detection Determination of Risk Exposure to Polycyclic Aromatics Hydrocarbons Biomarkers in Human Urine. *Bioanalysis*. 2017; 9(3): 265–278. <https://doi.org/10.4155/bio-2016-0125>
102. Martín-Tornero E., Luque-Uría A., Durán-Merás I., Espinosa-Mansilla A. A novel analytical methodology for the determination of hydroxy polycyclic aromatic hydrocarbons in breast and cow milk samples. *Journal of Chromatography B*. 2020; 1136: 121912. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2019.121912>
103. Santonicola S. *et al.* Comparative study on the occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons in breast milk and infant formula and risk assessment. *Chemosphere*. 2017; 175: 383–390. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.02.084>
88. Rawash E.-S.A., Mohamed G.G., Souaya E.R., Khalil L.H., El-Chaghaby G.A., El-Gammal M.H. Distribution and Health Hazards of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Egyptian Milk and Dairy-Based Products. *Beverages*. 2018; 4(3): 63. <https://doi.org/10.3390/beverages4030063>
89. Hasan G.M.M.A., Ali Shaikh M.A., Satter M.A., Hossain M.S. Detection of indicator polychlorinated biphenyls (I-PCBs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in cow milk from selected areas of Dhaka, Bangladesh and potential human health risks assessment. *Toxicology Reports*. 2022; 9: 514–1522. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2022.07.008>
90. Rincón J.C. *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in four milk brands sold in Mexico City: evaluating three fat extraction methods. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*. 2019; 10(4): 1064–1076. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v10i4.4763>
91. Kishikawa N., Wada M., Kuroda N., Akiyama S., Nakashima K. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in milk samples by high-performance liquid chromatography with fluorescence detection. *Journal of Chromatography B*. 2003; 789(2): 257–264. [https://doi.org/10.1016/S1570-0232\(03\)00066-7](https://doi.org/10.1016/S1570-0232(03)00066-7)
92. Yan K., Wu S., Gong G., Xin L., Ge Y. Simultaneous Determination of Typical Chlorinated, Oxygenated, and European Union Priority Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Milk Samples and Milk Powders. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2021; 69(13): 3923–3931. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c00283>
93. Sun Y., Yan K., Wu S., Gong G. Occurrence, spatial distribution and impact factors of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons in milks from nine countries. *Food Control*. 2020; 113: 107197. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107197>
94. Aguinaga N., Campillo N., Viñas P., Hernández-Córdoba M. A headspace solid-phase microextraction procedure coupled with gas chromatography–mass spectrometry for the analysis of volatile polycyclic aromatic hydrocarbons in milk samples. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2008; 391(3): 753–758. <https://doi.org/10.1007/s00216-008-1841-2>
95. Girelli A.M., Sperati D., Tarola A.M. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in Italian milk by HPLC with fluorescence detection. *Food Additives & Contaminants: Part A*. 2014; 31(4): 703–710. <https://doi.org/10.1080/19440049.2013.878959>
96. Dobrinás S., Soceanu A., Popescu V., Coatu V. Polycyclic aromatic hydrocarbons and pesticides in milk powder. *Journal of Dairy Research*. 2016; 83(2): 261–265. <https://doi.org/10.1017/S0022029916000169>
97. Hollosi L., Wenzl T. Development and optimisation of a dopant assisted liquid chromatographic-atmospheric pressure photo ionisation-tandem mass spectrometric method for the determination of 15 + 1 EU priority PAHs in edible oils. *Journal of Chromatography A*. 2011; 1218(1): 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2010.10.015>
98. Hernández-Arteseros J.A., Beltrán J.L., Compañó R., Prat M.D. Fast-scanning fluorescence spectroscopy as a detection system in liquid chromatography for confirmatory analysis of flumequine and oxolinic acid. *Journal of Chromatography A*. 2002; 942(1–2): 275–281. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(01\)01359-0](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(01)01359-0)
99. Bertoz V., Purcaro G., Conchione C., Moret S. A Review on the Occurrence and Analytical Determination of PAHs in Olive Oils. *Foods*. 2021; 10(2): 324. <https://doi.org/10.3390/foods10020324>
100. Avagyan R., Nyström R., Boman C., Westerholm R. Determination of hydroxylated polycyclic aromatic hydrocarbons by HPLC-photoionization tandem mass spectrometry in wood smoke particles and soil samples. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2015; 407(16): 4523–4534. <https://doi.org/10.1007/s00216-015-8638-x>
101. Luque-Uría Á., Espinosa-Mansilla A., Durán-Merás I. Hplc-Fast Scanning Fluorimetric Detection Determination of Risk Exposure to Polycyclic Aromatics Hydrocarbons Biomarkers in Human Urine. *Bioanalysis*. 2017; 9(3): 265–278. <https://doi.org/10.4155/bio-2016-0125>
102. Martín-Tornero E., Luque-Uría A., Durán-Merás I., Espinosa-Mansilla A. A novel analytical methodology for the determination of hydroxy polycyclic aromatic hydrocarbons in breast and cow milk samples. *Journal of Chromatography B*. 2020; 1136: 121912. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2019.121912>
103. Santonicola S. *et al.* Comparative study on the occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons in breast milk and infant formula and risk assessment. *Chemosphere*. 2017; 175: 383–390. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.02.084>

104. García Londoño V.A., Reynoso C.M., Resnik S. Polycyclic aromatic hydrocarbons in milk powders marketed in Uruguay. *Food Additives & Contaminants: Part B*. 2017; 10(4): 284–291. <https://doi.org/10.1080/19393210.2017.1349191>
105. Chung T.-L., Liao C.-J., Chen M.-F. Comparison of liquid–liquid extraction and solid-phase extraction for the determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in the milk of Taiwan. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2010; 41(2): 178–183. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2009.07.003>
106. Grova N. *et al.* Detection of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Levels in Milk Collected Near Potential Contamination Sources. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2002; 50(16): 4640–4642. <https://doi.org/10.1021/jf0201071>
107. Aguinaga N., Campillo N., Viñas P., Hernández-Córdoba M. Determination of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons in milk and related products using solid-phase microextraction coupled to gas chromatography–mass spectrometry. *Analytica Chimica Acta*. 2007; 596(2): 285–290. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2007.06.005>
108. Lin W., Wei S., Jiang R., Zhu F., Ouyang G. Calibration of the complex matrix effects on the sampling of polycyclic aromatic hydrocarbons in milk samples using solid phase microextraction. *Analytica Chimica Acta*. 2016; 933: 117–123. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2016.05.045>
109. Iwegbue C.M.A., Bassey F.I. Concentrations and health hazards of polycyclic aromatic hydrocarbons in selected commercial brands of milk. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2013; 7(4): 177–184. <https://doi.org/10.1007/s11694-013-9153-4>
110. Viteri F., Sánchez N.E., Alexandrino K. Determination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Leaf and Bark Samples of *Sambucus nigra* Using High-Performance Liquid Chromatography (HPLC). *Methods and Protocols*. 2023; 6(1): 17. <https://doi.org/10.3390/mps6010017>
111. Rey-Salgueiro L., Martínez-Carballo E., García-Falcón M.S., González-Barreiro C., Simal-Gándara J. Occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons and their hydroxylated metabolites in infant foods. *Food Chemistry*. 2009; 115(3): 814–819. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.12.095>
112. Naccari C., Cristani M., Giofrè F., Ferrante M., Siracusa L., Trombetta D. PAHs concentration in heat-treated milk samples. *Food Research International*. 2011; 44(3): 716–724. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.12.029>
113. Rey-Salgueiro L., García-Falcón M.S., Martínez-Carballo E., Simal-Gándara J. Effects of toasting procedures on the levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in toasted bread. *Food Chemistry*. 2008; 108(2): 607–615. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.11.026>
114. García Londoño V.A., García L.P., Scussel V.M., Resnik S. Polycyclic aromatic hydrocarbons in milk powders marketed in Argentina and Brazil. *Food Additives & Contaminants: Part A*. 2013; 30(9): 1573–1580. <https://doi.org/10.1080/19440049.2013.810347>

ОБ АВТОРАХ

Александр Анатольевич Лукин^{1,2}
кандидат технических наук, доцент
lukin3415@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-4753-3210>

Озлем Пелин Кан³
доктор философских наук, профессор кафедры гигиены и технологии пищевых продуктов факультета ветеринарной медицины
opcan@cumhuriyet.edu.tr
<https://orcid.org/0000-0002-1179-4227>

¹Южно-Уральский государственный аграрный университет,
ул. им. Гагарина, 13, Троицк, 457100, Россия

²Южно-Уральский государственный университет,
пр-т им. Ленина, 76, Челябинск, 454080, Россия

³Университет Сивас Джумхуриет,
Кампус университета, Сивас, 58140, Турция

104. García Londoño V.A., Reynoso C.M., Resnik S. Polycyclic aromatic hydrocarbons in milk powders marketed in Uruguay. *Food Additives & Contaminants: Part B*. 2017; 10(4): 284–291. <https://doi.org/10.1080/19393210.2017.1349191>
105. Chung T.-L., Liao C.-J., Chen M.-F. Comparison of liquid–liquid extraction and solid-phase extraction for the determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in the milk of Taiwan. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2010; 41(2): 178–183. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2009.07.003>
106. Grova N. *et al.* Detection of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Levels in Milk Collected Near Potential Contamination Sources. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2002; 50(16): 4640–4642. <https://doi.org/10.1021/jf0201071>
107. Aguinaga N., Campillo N., Viñas P., Hernández-Córdoba M. Determination of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons in milk and related products using solid-phase microextraction coupled to gas chromatography–mass spectrometry. *Analytica Chimica Acta*. 2007; 596(2): 285–290. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2007.06.005>
108. Lin W., Wei S., Jiang R., Zhu F., Ouyang G. Calibration of the complex matrix effects on the sampling of polycyclic aromatic hydrocarbons in milk samples using solid phase microextraction. *Analytica Chimica Acta*. 2016; 933: 117–123. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2016.05.045>
109. Iwegbue C.M.A., Bassey F.I. Concentrations and health hazards of polycyclic aromatic hydrocarbons in selected commercial brands of milk. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2013; 7(4): 177–184. <https://doi.org/10.1007/s11694-013-9153-4>
110. Viteri F., Sánchez N.E., Alexandrino K. Determination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Leaf and Bark Samples of *Sambucus nigra* Using High-Performance Liquid Chromatography (HPLC). *Methods and Protocols*. 2023; 6(1): 17. <https://doi.org/10.3390/mps6010017>
111. Rey-Salgueiro L., Martínez-Carballo E., García-Falcón M.S., González-Barreiro C., Simal-Gándara J. Occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons and their hydroxylated metabolites in infant foods. *Food Chemistry*. 2009; 115(3): 814–819. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.12.095>
112. Naccari C., Cristani M., Giofrè F., Ferrante M., Siracusa L., Trombetta D. PAHs concentration in heat-treated milk samples. *Food Research International*. 2011; 44(3): 716–724. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.12.029>
113. Rey-Salgueiro L., García-Falcón M.S., Martínez-Carballo E., Simal-Gándara J. Effects of toasting procedures on the levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in toasted bread. *Food Chemistry*. 2008; 108(2): 607–615. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.11.026>
114. García Londoño V.A., García L.P., Scussel V.M., Resnik S. Polycyclic aromatic hydrocarbons in milk powders marketed in Argentina and Brazil. *Food Additives & Contaminants: Part A*. 2013; 30(9): 1573–1580. <https://doi.org/10.1080/19440049.2013.810347>

ABOUT THE AUTHORS

Aleksander Anatolyevich Lukin^{1,2}
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
lukin3415@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-4753-3210>

Özlem Pelin Can³
Doctor of Philosophy, Professor, Department
of Hygiene and Food Technology, Faculty of Veterinary
Medicine
opcan@cumhuriyet.edu.tr
<https://orcid.org/0000-0002-1179-4227>

¹South Ural State Agrarian
University,
13 Gagarin Str., Troitsk, 457100, Russia

²South Ural State University,
76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russia

³Sivas Cumhuriyet University,
Campus Central Sivas, Sivas, 58140, Türkiye