

Газеев И.Р.¹, Лукин А.А.^{2,3}, Гизатова Н.В.¹, Латыпова Г.Ф.¹

Микро- и нанопластик: происхождение, источники поступления и влияние на здоровье человека (обзор литературы)

¹ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет», 450001, Уфа, Россия;²ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет», 457103, Троицк, Россия;³ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», 454080, Челябинск, Россия

РЕЗЮМЕ

Цель обзора — объединение и систематизация информации о механизмах взаимодействия микропластика и живых организмов, а также анализ влияния этих процессов на состояние здоровья. Релевантные статьи для обзора были получены через онлайн-поиск в библиографических ресурсах Scopus, Web of Science и Google Scholar.

Накопленные научные исследования убедительно свидетельствуют о том, что микропластик (МП) и нанопластик (НП) становятся всё более серьёзной проблемой для экологии и здоровья человека, требующей комплексного и многостороннего рассмотрения. Широкое распространение в природных системах и человеческом организме, а также уникальные физико-химические характеристики выделяют МП и НП в категорию новых загрязнителей, способных оказать существенное негативное влияние на различные органы и системы, в том числе эндокринную, нервную, дыхательную, сердечно-сосудистую и репродуктивную. Несмотря на достигнутый прогресс в изучении МП и НП, не до конца выяснены механизмы их токсического воздействия, последствий долгосрочного воздействия и взаимодействия с другими химическими соединениями.

Заключение. Необходимо активизировать научные изыскания, разработать более совершенные методы обнаружения НП и МП, внедрить действенные стратегии по снижению негативных последствий как на локальном, так и на глобальном уровнях. Подчёркивается также необходимость разработки эффективной государственной политики, обновления нормативных документов, повышения экологической грамотности населения и пересмотра моделей потребления, что позволит сократить объёмы производства пластика и способствовать развитию циклической экономики. Только посредством согласованных действий правительств, промышленных предприятий, научного сообщества и граждан можно будет эффективно решить эту задачу, обеспечив защиту здоровья людей и безопасность планеты.

Ключевые слова: микропластик; нанопластик; здоровье; риски; пластик; экология; обзор

Для цитирования: Газеев И.Р., Лукин А.А., Гизатова Н.В., Латыпова Г.Ф. Микро- и нанопластик: происхождение, источники поступления и влияние на здоровье человека (обзор литературы). *Гигиена и санитария*. 2025; 104(10): 1290–1295. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-10-1290-1295> <https://elibrary.ru/oiivfh>

Для корреспонденции: Лукин Александр Анатольевич, e-mail: lukin3415@gmail.com

Участие авторов: Лукин А.А. — написание текста; Газеев И.Р. — концепция обзора; Гизатова Н.В. — составление резюме, редактирование; Латыпова Г.Ф. — обработка данных. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех её частей.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Поступила: 07.07.2025 / Принята к печати: 15.10.2025 / Опубликовано: 14.11.2025

Igor R. Gazeev¹, Aleksandr A. Lukin^{2,3}, Natalia V. Gizatova¹, Gulnara F. Latypova¹

Micro- and nanoplastics: origin, sources of intake and impact on human health (literature review)

¹Bashkir State Agrarian University, Ufa, 450054, Russian Federation;²Southern- Ural State Agrarian University, Troitsk, 457103, Russian Federation;³South-Ural State University (National Research University), 454080, Chelyabinsk, Russian Federation

ABSTRACT

This review aims to consolidate information on the mechanisms of interaction between microplastics and living organisms and analyze the impact of these processes on health. For this review, relevant scientific reports were found through an online search in the bibliographic resources Scopus, Web of Science, and Google Scholar. Accumulated scientific research convincingly demonstrates micro- and nanoplastics to represent an increasingly serious problem for the environment and human health, requiring a comprehensive and multifaceted consideration. Their widespread occurrence in natural systems and the human body and their unique physicochemical properties, distinguish them as an emerging pollutant that can have a significant adverse impact on various organs and systems, including the endocrine, nervous, respiratory, cardiovascular, and reproductive systems. Despite the progress made in their study, significant gaps in understanding remain, especially with regard to the mechanisms of toxic effects, the effects of long-term exposure and interactions with other chemical compounds.

Conclusion. There is a need to intensify scientific research, develop better detection methods and implement effective strategies to reduce adverse impacts at both local and global levels. There is also emphasized the need to develop effective public policies, update regulations, improve environmental awareness and revise consumption patterns, which will reduce plastic production and promote the development of a circular economy. Only through concerted action by governments, industry, the scientific community, and citizens will it be possible to effectively address this problem, ensuring the protection of human health and the preservation of the planet.

Keywords: microplastic; nanoplastic; health; risks; plastic; ecology; review

For citation: Gazeev I.R., Lukin A.A., Gizatova N.V., Latypova G.F. Micro- and nanoplastics: origin, sources of intake and impact on human health ((literature review). *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2025; 104(10): 1290–1295. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-10-1290-1295> <https://elibrary.ru/oiivfh> (In Russ.)

For correspondence: Aleksandr A. Lukin, e-mail: lukin3415@gmail.com

Contribution: Lukin A.A. — writing the article; Gazeev I.R. — review concept; Gizatova N.V. — compiling a summary, literary processing; Latypova G.F. — data processing. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Funding. The study had no sponsorship.

Received: July 7, 2025 / Accepted: October 15, 2025 / Published: November 14, 2025

В современном мире пластик — незаменимый материал, повсеместно используемый благодаря своей прочности и лёгкости производства. Однако в последние годы он стал причиной серьёзной обеспокоенности учёных и широкой общественности из-за негативного воздействия на экологию, живые организмы и особенно на здоровье человека. Согласно глобальному анализу, с 1950 по 2015 г. на свалках и в окружающей среде скопилось около 4,9 млрд тонн пластиковых отходов. Ожидается, что к 2050 г. это количество вырастет до 12 млрд тонн, что неизбежно приведёт к масштабному загрязнению пластиком [1]. Ситуация усугубилась пандемией COVID-19, когда массовое использование масок из пластиковых полимеров (полипропилена) привело к образованию ещё большего количества пластиковых отходов, которые из-за неэффективных стратегий утилизации накапливаются в окружающей среде [2]. Эти пластики медленно разрушаются, теряя свою целостность и распадаясь на более мелкие частицы — микропластик (МП), который также может производиться изначально в таком виде. В 2020 г. ISO (International Organization for Standardization — Международная организация по стандартизации) определила микропластик как «любую твёрдую, нерастворимую в воде частицу размером от 1 до 1000 мкм». Директива 2019/904 признаёт загрязнение почвы микропластиком новой и приоритетной проблемой при анализе воды [3].

Разложение пластика происходит под влиянием химических и физических реакций, среди которых выделяют фоторазложение, окисление, гидrolитическое разрушение и механическое измельчение. Характер этих процессов зависит от вида полимера и его строения. Ультрафиолетовое излучение как компонент солнечного света вызывает фотодegradацию, приводящую к разрыву химических связей в синтетических полимерах. Этот процесс оказывает влияние не только на полимеры, но и на добавки, присутствующие в материалах, изменяя их химическую структуру и физические характеристики. Кислород способен усиливать поглощение УФ-излучения, образуя соединения с ненасыщенными углеводородами, что ускоряет процесс разрушения.

Некоторые полимеры, например, полиэфиры и полиамиды, подвержены гидролизу, то есть расщеплению сложных связей под воздействием воды. Механические воздействия также способствуют дроблению на мелкие фрагменты, размер которых постепенно уменьшается. В результате деградации пластика образуется разнородная смесь частиц, отличающихся по размеру, форме, плотности и химическому составу в зависимости от исходного материала [3].

Для данного обзора релевантные научные статьи были получены через онлайн-поиск в библиографических ресурсах Scopus, Web of Science и Google Scholar.

Изначально микропластиковое загрязнение рассматривалось преимущественно как проблема морей, но теперь оно перешло на уровень здоровья населения [4–6]. Современные исследования демонстрируют повсеместное распространение МП на всех континентах и во всех океанах нашей планеты. По мере непрерывного фрагментирования и рассеивания частицы микропластика обнаруживаются в разных средах: воздухе, почве, донных отложениях, поверхностных и подземных водах [7], песке на пляжах [8], морских экосистемах, водных толщах, глубоководных отложениях [9]. МП находят даже в отдалённых полярных областях и ледниках [10–12]. Отмечается, что вне зависимости от места и времени взятия пробы в ней с высокой вероятностью будут обнаружены микропластики, а также пластиковые гранулы.

В зависимости от происхождения МП подразделяются на первичные и вторичные. Первичные создаются специально для конкретных целей, например, в виде микрогранул или пеллет. Они находят применение в разнообразных продуктах, таких как чистящие средства, косметика, краски, эксфолианты и зубные пасты. Производство и использование первичного микропластика вносит значительный вклад в рост загрязнения окружающей среды. Кроме того, первичные микропластики применяются в производстве пласти-

ков, например, гранул, используемых в процессах формовки и экструзии для придания формы пластиковым изделиям. Некоторые первичные МП и содержащиеся в них добавки, такие как фталаты, используются в медицине, в том числе в составе лекарственных препаратов. Например, препарат «Асакол», применяемый при лечении язвенного колита лёгкой и средней степени тяжести, содержит в определённых концентрациях монобутилфталат и диметилфталат, которые обеспечивают полезные свойства — устойчивость к перевариванию в желудке и контроль скорости всасывания активного вещества. Другие препараты («Видекс ЕС», «Креон») также содержат фталаты, выполняющие функции вспомогательных веществ, искусственных ароматизаторов и др. [4].

МП вторичного происхождения образуются при разрушении и измельчении крупных пластиковых отходов под воздействием окружающей среды, что может происходить во время их перемещения в разные экологические системы. К этой же категории относятся синтетические волокна, высвобождаемые из тканей. Основные источники МП в окружающей среде представлены в табл. 1.

Распад макропластика на более мелкие частицы может происходить различными путями. Например, фотодegradация вызывается солнечным светом, который окисляет полимеры, приводя к разрыву химических связей, снижению молекулярной массы и, как следствие, к хрупкости материала и его фрагментации. Биодegradация, осуществляемая бактериями и грибами, также играет роль в разрушении некоторых видов пластика.

В морских условиях макропластик подвергается механическому износу под влиянием ветра, волн и трения о донные отложения и песок. Кроме того, как натуральные, так и синтетические волокна, содержащиеся в одежде, высвобождаются при стирке и попадают в сточные воды. Даже обычное использование пластиковой упаковки может привести к образованию микропластика в результате истирания и последующему его попаданию в окружающую среду.

Нанопластики — это частицы размером от 1 до 100 нанометров. Выявление их в окружающей среде — сложная задача из-за технических проблем, связанных с выделением этих частиц и точным измерением концентраций. Нанопластики попадают в окружающую среду в результате разрушения крупных пластиковых изделий, что делает их серьёзной угрозой экологии и здоровью человека.

Химические свойства нанопластиков варьируются в зависимости от размера и площади поверхности. Их миниатюрный размер облегчает проглатывание организмами, находящимися в начале пищевой цепи.

Ключевой характеристикой, усиливающей вредное воздействие нанопластиков, является высокое соотношение площади поверхности к объёму, что позволяет им адсорбировать другие загрязняющие вещества, такие как стойкие органические загрязнители (СОЗ), которые затем подвергаются биоаккумуляции и биоусилению в организмах. Важно отметить, что продолжительное воздействие высоких концентраций нанопластиков может вызывать тератогенные эффекты и негативно влиять на центральную нервную систему [13].

В работе J. Yin и соавт. [20] рассмотрено воздействие микро- и наночастиц пластика на состояние печени. Результаты работы продемонстрировали способность микропластика к аккумуляции в печени, что влечёт за собой структурные изменения и потенциальную угрозу для человеческого организма. В основе механизма токсического воздействия лежат окислительный стресс и воспалительные реакции в клетках печени. Важно отметить, что МП и НП не только запускают окислительный стресс и воспалительные процессы, но и нарушают функциональность печени, влияя на липидный обмен. При этом степень воздействия МП на липидный обмен в печени оказалась более выраженной, чем у НП. Метаболический анализ, проведённый на рыбах данио-рерио, подвергшихся воздействию полистиролового микро- и нанопластика, выявил изменения в 21 и 11 метаболитах соответственно.

Таблица 1 / Table 1

Основные источники микропластика в окружающей среде

Main sources of microplastics in the environment

Источник микропластика Source of microplastics	Комментарий Comment	Источник Source
Автомобильные шины Car tires	Оценка индивидуального годового вклада микропластика от износа шин варьируется от 0,23 до 4,7 кг, при этом среднемировой уровень составляет 0,81 кг. По сравнению с другими источниками микропластика, такими как авиационные шины (2% износа), искусственные спортивные покрытия (12–50% износа), тормозные колодки (8% износа) и дорожная разметка (5% износа), автомобильные шины при полном износе представляют собой значительно больший источник загрязнения. В недавнем исследовании установлено, что вклад дорожной разметки в образование микропластика относительно невелик и составляет от 0,1 до 4,3 г на человека в год Estimates of the individual annual contribution of microplastics from tire wear range from 0.23 to 4.7 kg, with a global average of 0.81 kg. Compared to other sources of microplastics, such as aircraft tires (2% wear), artificial sports surfaces (12–50% wear), brake pads (8% wear) and road markings (5% wear), fully worn car tires represent a significantly larger source of pollution. A recent study found the contribution of road markings to microplastic formation to be relatively small, ranging from 0.1 to 4.3 g per person per year	[14]
Бутилированная вода Bottled water	Изучение бутилированной воды одиннадцати брендов выявило наличие микропластика в 93% образцов. В среднем концентрация составила 325 частиц на литр (преимущественно полипропилен из крышек). Это повсеместное загрязнение, скорее всего связанное с процессами упаковки и розлива, указывает на важную потребность в изучении последствий воздействия микро- и нанопластика на организм A global study of eleven bottled water brands revealed microplastics in 93% of samples. In an average concentration of 325 particles per liter, mostly polypropylene from bottle caps. This widespread contamination, likely linked to packaging and bottling processes, highlights the urgent need to understand the health effects of micro- and nanoplastics	[15]
Одноразовая пластиковая посуда Disposable plastic tableware	Анализ показывает, что систематическое применение стаканчиков из пластика способно вызвать случайное попадание в организм от 37 613 до 89 294 микроскопических частиц пластика ежегодно. Это указывает на важность пристального внимания к данному фактору загрязнения окружающей среды Analysis shows that regular use of plastic cups can cause accidental ingestion of between 37,613 and 89,294 microscopic plastic particles each year, highlighting the importance of paying close attention to this environmental pollution factor	[16]
Косметическая промышленность Cosmetic industry	В составе многих очищающих средств натуральные компоненты были вытеснены микропластиком, часто называемым микросферами (микроэкзфолиантами). Как правило, они производятся из таких видов пластика, как полиэтилен, полипропилен, ПЭТ и нейлон. Эти микрочастицы пластика широко используются в производстве гелей для умывания и жидкого мыла для рук и, как правило, после применения попадают в сточные воды In many cleansers, natural ingredients have been replaced by microplastics, often called "microspheres" or "microexfoliants." They are typically made from plastics such as polyethylene, polypropylene, PET, and nylon. These microplastics are widely used in products such as face washes and liquid hand soaps, and are often released into wastewater after use	[17]
Одежда Cloth	За последнее десятилетие увеличилось число исследований, указывающих на растущее загрязнение окружающей среды текстильными микроволокнами. В среднем каждый человек использует ~ 25 кг текстильной продукции в год и регулярно подвергает свою одежду стирке. Подобная частота стирок, оцениваемая примерно в 6 кг белья два раза в месяц, приводит к тому, что в окружающую среду ежегодно попадает от одного человека до 14 400 мг текстильных фрагментов Over the last decade, there has been a significant increase in the number of scientific papers pointing to the growing problem of textile microfiber pollution. This is due to the fact that on average, each person uses about 25 kg of textile products per year and regularly washes their clothes. This frequency of washing, estimated at about 6 kg of laundry twice a month, results in about 14,400 mg of textile fragments being released into the environment per person each year	[18]
Пластиковые контейнеры Plastic containers	Ёмкости из пластика способны выделять микро- и наночастицы пластика в пищу и напитки, которые в них хранятся Plastic containers can release micro- and nanoparticles of plastic into the food and drinks stored in them	[19]

E. Molina и S. Benedé [21] проанализировали воздействие микро- и нанопластика в пищевых продуктах на здоровье человека, сделав особый акцент на связь с пищевой аллергией. Авторы утверждают, что нанопластик способен вызывать физические повреждения слизистой оболочки кишечника одним своим присутствием. Возможность блокировки кишечника или повреждения тканей подчёркивает потенциальную токсичность этих частиц.

Кишечный эпителий играет ключевую роль в защите от пищевых аллергенов, и его барьерная функция тесно связана с плотными контактами, такими как Zonula occludens 1–3, occludin и claudins 1–5, 20. Нарушение этих контактов может способствовать усиленному проникновению аллергенов через эпителий. Более того, в ответ на стресс или повреждение клетки кишечника выделяют провоспалительные цитокины, такие как IL-33, IL-25 и TSLP. Эти цитокины активируют врождённые лимфоидные клетки группы 2, что приводит к выработке IL-4, IL-5 и IL-13, которые в свою очередь стимулируют дендритные клетки к активации Th2-фенотипа в Т-клетках, а также напрямую стимулируют

адаптивные иммунные ответы Th2 и потенциальные аллергические реакции.

Присутствие МП в пище и его влияние на пищеварительную систему также изучали M. Schwarzfischer и G. Rogler [22]. В статье рассмотрены риски, связанные с диоксидом титана (TiO₂) и пластиковыми микропластиками в пище, а также подчёркнута значимость кишечного барьера в защите от этих веществ. Исследования показывают, что наночастицы диоксида титана (TiO₂) могут проникать через эпителий подвздошной кишки и пейеровы бляшки, что приводит к ухудшению состояния эпителия и возникновению стойких повреждений.

B. Zhao и соавт. [23] анализировали риски, связанные с воздействием микропластика на организм. Авторы отмечают, что после попадания в организм МП могут распространяться, поражая различные органы и ткани. Наибольшее накопление микропластиков наблюдается в лёгких, сердце, печени и кишечнике, при этом пищеварительный тракт рассматривается как основное место концентрации и проявления токсичности МП.

В исследовании N. Ali и соавт. [24] рассмотрены пути воздействия микропластиков на человека и их потенциальное влияние на здоровье, в том числе роль в окислительном стрессе, воспалительных процессах и нарушениях иммунной системы. Авторы подчёркивают расширение производства пластика, его фрагментацию на микро- и наночастицы и, как следствие, воздействие на человека через пищу, дыхание и кожный контакт. Особое внимание уделяется присутствию МП в морепродуктах и возможности интеграции в пищевую цепь. Также изучены процессы взаимодействия микропластиков с клетками и их проникновение внутрь с акцентом на эндоцитоз, влияние характеристик частиц на клеточные взаимодействия, транслокация и распределение МП внутри организма, в частности накопление в тканях и органах.

K. Blackburn и D. Green [25] анализируют повсеместное распространение микропластика в различных средах и его вероятное влияние на здоровье людей. Микропластики обнаруживаются в воде, донных отложениях, живых организмах и атмосфере. Несмотря на активное изучение их воздействия на фауну и флору, последствия для здоровья человека остаются малоизученными. В исследовании рассматривается влияние МП на организм человека через пищу, воду и вдыхаемый воздух, а также используются данные, полученные при изучении дикой природы, для оценки потенциальных рисков. Авторы классифицируют воздействие микропластика на здоровье по трём категориям: химическое, физическое и биологическое. Это токсичные добавки, содержащиеся в пластике, такие как фталаты и бисфенол-А, вторичные токсины, возникающие в результате адсорбции загрязняющих веществ (СОЗ), а также физическое воздействие при вдыхании микропластика из воздуха и проглатывании. Химическое воздействие может вызывать токсические и эндокринные нарушения из-за пластиковых добавок. Физическое воздействие вызывает беспокойство при вдыхании волокнистого микропластика из синтетических тканей, что может привести к воспалению или проблемам в дыхании. Что касается проглатывания, то наличие МП в пищевых продуктах (соль, вода, морепродукты) вызывает опасения из-за внутреннего воздействия и его последствий для здоровья. Несмотря на отсутствие прямых доказательств, связывающих потребление микропластика с негативными последствиями для здоровья человека, предварительные исследования и экстраполяции из исследований дикой природы указывают на возможные иммунные и стрессовые реакции, репродуктивную токсичность и проблемы развития вследствие воздействия МП. Авторы подчёркивают необходимость дальнейших исследований для более полного понимания влияния этого загрязнителя на окружающую среду и здоровье человека.

D. Zhang и соавт. [26] обращают внимание на усиление загрязнения окружающей среды микропластиком и возможные последствия для здоровья людей. В работе особое внимание уделено обнаружению микропластика в желчных конкрементах человека и изучению влияния этих частиц на процесс формирования камней. Исследование проводилось в период с июля по октябрь 2020 г. на базе больницы Чанхай. Выборка состояла из 16 пациентов (средний возраст 55 лет, 50% мужчин и 50% женщин). В исследовании подчёркивается, что взрослые люди могут употреблять в пищу более 5 г пластика еженедельно, при этом различные виды пластика были обнаружены в человеческом кале. Акцентируя внимание на желчнокаменной болезни как на значимой проблеме желудочно-кишечного тракта, авторы рассматривают механизмы образования желчных камней, особенно холестерина, и отмечают рост заболеваемости. Симптомы и факторы риска желчнокаменной болезни хорошо известны, однако точные механизмы её развития, в особенности у молодых людей, до конца не исследованы. Основная цель исследования — анализ желчных камней пациентов на наличие микропластика. В результате анализа исследователи обнаружили несколько типов микропластика в желчных камнях,

и наиболее распространённым оказался полистирол. Данное открытие ставит вопрос о потенциальной роли микропластика в процессе формирования желчных камней. В работе выдвинута новая гипотеза о том, что МП, присутствующий в желчных камнях, может способствовать развитию желчнокаменной болезни путём образования гетероагрегатов холестерина с микропластиком. Исследование открывает перспективу в изучении загрязнения микропластиком. Высказано предположение, что он может играть определённую роль в образовании желчных камней у человека.

R. Martin-Folgar и соавт. [27] изучали влияние нанопластика на здоровье людей, уделяя особое внимание действию на нервные стволовые клетки. В работе для анализа эффектов 30-нанометровых полистирольных наночастиц применялась линия человеческих нервных стволовых клеток (hNS1). После четырёх дней воздействия были установлены молекулярные изменения в клетках, в том числе окислительный и клеточный стресс, повреждения ДНК, сдвиги в воспалительном ответе и апоптоз. Эти процессы потенциально способны привести к повреждению тканей и нейродегенеративным болезням. Данный метод позволяет детально оценить воздействие нанопластика на нервные стволовые клетки человека. Учёные выяснили, что нанопластик влияет на активность генов в зависимости от его концентрации: одни гены начинают работать активнее, другие — наоборот. Особенно заметны изменения после контакта с наночастицами в экспрессии генов, отвечающих за реакцию на стресс, — hsp27/hspB1, hsp70/hspA5 и hsp90α.

M. Bonanomi и соавт. [28] провели детальное исследование влияния микро- и нанопластика на здоровье человека. Для оценки воздействия полистирольных нано- и микропластиков на метаболизм клеток CCD-18Co толстой кишки человека учёные провели всесторонний анализ метаболизма с применением масс-спектрометрии. Для изучения канцерогенного потенциала указанных частиц был использован азоксиметан (АОМ) — известный канцероген, вызывающий рак толстой кишки у грызунов. Иерархическая кластеризация продемонстрировала, что метаболический профиль клеток, подвергшихся воздействию нанопластиков, имел сходство с профилем клеток, обработанных АОМ в концентрации 10 мкг/мл в течение 48 ч, в отличие от контрольной группы и других исследуемых групп. Анализ выявил значительное участие метаболических путей, таких как эффект Варбурга, метаболизм аминокислот и окислительно-восстановительные процессы. При этом 47 ключевых метаболитов были общими как для воздействия нанопластиков, так и для обработки АОМ. Дальнейший анализ показал ранние метаболические сдвиги, затрагивающие эффект Варбурга, метаболизм глутамата и глутатиона под влиянием нанопластиков и АОМ. Наблюдалось повышение уровня метаболитов, связанных с гликолизом, циклом трикарбоновых кислот (ЦТК) и пентозофосфатным путём, наряду с заметным снижением соотношения GSH/GSSG, что указывает на окислительный стресс. Кроме того, повышенный метаболизм глутамата был характерен для обработки нано- и микропластиков и АОМ. Изучение метаболических процессов с использованием меченой изотопами глюкозы и глутамата показало усиленное окисление глюкозы до лактата при всех видах воздействия. В клетках, обработанных нанопластиками, было обнаружено увеличение производства метаболитов, участвующих в антиоксидантных путях, таких как 6-фосфоглюконолактон и глутатион. Отмечено повышение промежуточных продуктов цикла ЦТК и уровней метаболитов ЦТК, полученных из глутамата, при кратковременном воздействии. Результаты подчёркивают метаболическую адаптацию к стрессу, схожую с изменениями, наблюдаемыми при опухолеобразовании, и позволяют предположить, что даже кратковременное воздействие нанопластиков способно вызвать значительные метаболические изменения в клетках толстой кишки человека.

Z. Chen и соавт. [29] сосредоточили свои исследования на изучении последствий для здоровья, вызванных загряз-

Таблица 2 / Table 2

Влияние микропластиков на органы и системы организма человека
The impact of microplastics on organs and systems of the human body

Воздействие и накопление микропластика Exposure and accumulation of microplastics	Комментарий Comment
Метаболические и биохимические нарушения Metabolic and biochemical disorders	Влияние микро- и наночастиц дестабилизирует метаболические процессы и биохимические реакции. В частности, модификации эффекта Варбурга, глутаматного метаболизма и пентозофосфатного пути свидетельствует о значительной метаболической адаптации, сходной с процессами, наблюдаемыми при развитии рака. Данные отклонения, как правило, проявляются в зависимости от концентрации и становятся более выраженными при уменьшении размера частиц The effects of micro- and nanoparticles destabilize metabolic processes and biochemical reactions. In particular, modifications of the Warburg effect, glutamate metabolism, and the pentose phosphate pathway indicate to significant metabolic adaptations similar to those observed in cancer development. These deviations are generally concentration-dependent and become more pronounced with decreasing particle size
Воздействие на желудочно-кишечный тракт и печень Gastrointestinal and hepatic effects	Микропластики разрушают защитный барьер ЖКТ и провоцируют поражение печени. Научные работы демонстрируют, что микропластики негативно влияют на белки, формирующие плотные контакты в кишечнике и обеспечивающие его целостность. Это облегчает проникновение аллергенов и нарушает липидный обмен в печени, что в свою очередь приводит к усилению окислительного стресса и воспалительных процессов Microplastics destroy the protective barrier of the gastrointestinal tract and provoke liver damage. Scientific studies show that microparticles adversely affect proteins that form tight junctions in the intestine and ensure its integrity. This facilitates the penetration of allergens and disrupts lipid metabolism in the liver, which, in turn, leads to an increase in oxidative stress and inflammatory processes
Иммунологические и воспалительные реакции Immunological and inflammatory responses	Длительное влияние миаdverskропластиков стимулирует высвобождение цитокинов, вызывающих воспаление, и модифицирует иммунный ответ организма. Это в свою очередь может увеличить вероятность развития аллергических реакций, иммунных дисфункций и воспалительных процессов Long-term exposure to microplastics stimulates the release of pro-inflammatory cytokines and modifies the body's immune response. This, in turn, may increase the likelihood of developing allergic responses, immune dysfunction, and other inflammatory diseases
Последствия для эндокринной и репродуктивной систем Consequences for the endocrine and reproductive systems	Наличие микропластика в человеческом теле негативно сказывается на гормональном балансе и репродуктивной системе. Это указывает на возможность развития эндокринных расстройств, способных оказать неблагоприятное воздействие на фертильность и гормональный фон человека The presence of microplastics in the human body has an adverse impact on hormonal balance and the reproductive system. This indicates the possibility of developing endocrine disorders that can have an adverse effect on fertility and the overall hormonal state of a person

нением микропластиком. Особое внимание было уделено влиянию полистирольных микропластиков на функциональное состояние печени человека. Для понимания механизмов, посредством которых нарушение активности ABC-транспортёров, играющих ключевую роль в детоксикации печени, может приводить к увеличению внутриклеточной концентрации ксенобиотиков и повышению химической чувствительности, была исследована функциональность этих транспортёров. Используя флуоресцентный зонд САМ, исследователи оценили активность оттока ABC-транспортёров в клетках THLE-2, подвергнутых воздействию полистирольного микропластика. САМ, превращающийся внутри клеток в кальцеин, подчёркивает активность транспортёра, так как кальцеин не выводится ABC-транспортёрами и остаётся в цитоплазме. Повышенная флуоресценция, наблюдаемая при использовании МК571 в качестве положительного контроля для ингибирования активности ABC-транспортёров, показала, что длительное воздействие полистирола, особенно частиц размером 0,1 мкм, значительно уменьшает отток ксенобиотиков. Дополнительные эксперименты с использованием мышьяка (As), известного субстрата для ABC-транспортёров, в качестве ксенобиотического загрязнителя показали, что воздействие микропластиков существенно увеличивает образование активных форм кислорода (АФК) в ответ на As, что подтверждает усиление цитотоксического действия мышьяка из-за подавления активности транспортёра. Это согласуется с предыдущими исследованиями, в которых различные наноматериалы в низких концентрациях выступали в роли хемосенсибилизаторов, блокируя активность ABC-транспортёров в различных типах клеток. Примечательно, что концентрация микропластиков, необходимая для хемосенсибилизации в клетках аденокарциномы толстой кишки человека Caco-2, была в 100 раз выше, чем установленная в данном исследовании, что подчёрки-

вает потенциальную зависимость реакции клеточной линии от времени воздействия МП.

Комплексный анализ научной литературы, посвящённой воздействию микропластика, свидетельствует о существенном и многогранном влиянии этих частиц на организм человека, повсеместном распространении загрязнения микропластиком и его вероятной способности нарушать основные биологические механизмы. Это может приводить к отягощению имеющихся болезней или развитию новых. Основные результаты выполненного анализа представлены в табл. 2.

Анализ показал, что степень экологического влияния и размеры микро- и наночастиц играют ключевую роль в их воздействии на здоровье. Нанопластик в силу своего малого размера демонстрирует более выраженные негативные последствия из-за повышенной химической активности и улучшенной способности преодолевать защитные барьеры организма.

Заключение

Многочисленные исследования убедительно показывают, что микропластик оказывает комплексное негативное воздействие на здоровье людей, однако понимание отдалённых последствий и всего масштаба влияния на организм остаётся неполным. Полученные данные подтверждают необходимость активной исследовательской деятельности для всестороннего изучения этих последствий и разработки соответствующих рекомендаций в области здравоохранения. Необходимо разработать и внедрить эффективные стратегии, направленные на снижение негативного воздействия и уменьшение объёмов производства пластиковых отходов, чтобы обеспечить защиту здоровья человека и безопасность окружающей среды.

Литература / References

1. Akanyange S.N., Lyu X., Zhao X., Li X., Zhang Y., Crittenden J.C., et al. Does microplastic really represent a threat? A review of the atmospheric contamination sources and potential impacts. *Sci. Total. Environ.* 2021; 777: 146020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146020>
2. Shen M., Zeng Z., Song B., Yi H., Hu T., Zhang Y., et al. Neglected microplastics pollution in global COVID-19: Disposable surgical masks. *Sci. Total. Environ.* 2021; 790: 148130. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148130>
3. Lehner R., Weder C., Petri-Fink A., Rothen-Rutishauser B. Emergence of nanoplastic in the environment and possible impact on human health. *Environ. Sci. Technol.* 2019; 53(4): 1748–65. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05512>
4. Castañeta G., Gutiérrez A.F., Nacaratte F., Manzano C.A. Microplásticos: un contaminante que crece en todas las esferas ambientales, sus características y posibles riesgos para la salud pública por exposición. *Rev. Boliv. Quím.* 2020; 37(3): 160–75. <https://doi.org/10.34098/2078-3949.37.3.4>
5. Kim Y., Jeong J., Lee S., Choi I., Choi J. Identification of adverse outcome pathway related to high-density polyethylene microplastics exposure: *Caenorhabditis elegans* transcription factor RNAi screening and zebrafish study. *J. Hazard. Mater.* 2020; 388: 121725. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121725>
6. Zhu L., Zhu J., Zuo R., Xu Q., Qian Y., An L. Identification of microplastics in human placenta using laser direct infrared spectroscopy. *Sci. Total. Environ.* 2023; 856(Pt. 1): 159060. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159060>
7. Flaws J., Damdimopoulou P., Patisaul H.B., Gore A., Raetzman L., Vandenberg L.N. Plastics, EDCs & Health: a guide for public interest organizations and policy-makers on endocrine disrupting chemicals & plastics. Endocrine Society and IPEN; 2020.
8. Bayo J., Baeza-Martínez C., González-Pleiter M., García-Pachón E., López-Castellanos J., Doval M., et al. Respiramos plástico: detección de microplásticos en el sistema respiratorio humano. *Rev. Salud. Ambient.* 2024; 24(1): 107–16.
9. Zheng H., Vidili G., Casu G., Navare E.P., Sechi L.A., Chen Y. Microplastics and nanoplastics in cardiovascular disease – a narrative review with worrying links. *Front. Toxicol.* 2024; 6: 1479292. <https://doi.org/10.3389/ftox.2024.1479292>
10. Anand U., Dey S., Bontempi E., Ducoli S., Vethaak A.D., Dey A., et al. Biotechnological methods to remove microplastics: a review. *Environ. Chem. Lett.* 2023; 21(3): 1787–810. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01552-4>
11. Veluru S., Ramakrishna S. Biotechnological approaches: degradation and valorization of waste plastic to promote the circular economy. *Circular. Economy.* 2024; 3(1): 100077. <https://doi.org/10.1016/j.ccc.2024.100077>
12. Bennett E.R., Panagiotakis I. *Microplastic in the Environment: Pattern and Process. Environmental Contamination Remediation and Management.* Cham: Springer; 2022. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-78627-4>
13. Song J., Cui S., Li P., Mingrui L. Progress on ecotoxicological effects of microplastics loaded pollutants. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2018; 186(3): 012027.
14. Burghardt T.E., Pashkevich A., Babić D., Mosböck H., Babić D., Żakowska L. Microplastics and road markings: the role of glass beads and loss estimation. *Transp. Res. D. Transp. Environ.* 2022; 102: 103123. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103123>
15. Mason S.A., Welch V.G., Neratko J. Synthetic polymer contamination in bottled water. *Front. Chem.* 2018; 6: 407. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00407>
16. Zhou G., Wu Q., Tang P., Chen Ch., Cheng X., Wei X.F., et al. How many microplastics do we ingest when using disposable drink cups? *J. Hazard. Mater.* 2023; 441: 129982. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129982>
17. Anderson A.G., Grose J., Pahl S., Thompson R.C., Wyles K.J. Microplastics in personal care products: Exploring perceptions of environmentalists, beauticians and students. *Mar. Pollut. Bull.* 2016; 113(1–2): 454–60. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.10.048>
18. De Falco F., Di Pace E., Cocca M., Avella M. The contribution of washing processes of synthetic clothes to microplastic pollution. *Sci. Rep.* 2019; 9(1): 6633. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43023-x>
19. Hussain K.A., Romanova S., Okur I., Zhang D., Kuebler J., Huang X., et al. Assessing the Release of Microplastics and Nanoplastics from Plastic Containers and Reusable Food Pouches: Implications for Human Health. *Environ. Sci. Technol.* 2023; 57(26): 9782–92. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c01942>
20. Yin J., Ju Y., Qian H., Wang J., Miao X., Zhu Y., et al. Nanoplastics and microplastics may be damaging our livers. *Toxics.* 2022; 10(10): 586. <https://doi.org/10.3390/toxics10100586>
21. Molina E., Benedit S. Is there evidence of health risks from exposure to micro- and nanoplastics in foods? *Front. Nutr.* 2022; 9: 910094. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.910094>
22. Schwarzfischer M., Rogler G. The intestinal barrier – shielding the body from nano- and microparticles in our diet. *Metabolites.* 2022; 12(3): 223. <https://doi.org/10.3390/metabo12030223>
23. Zhao B., Rehati P., Yang Z., Cai Z., Guo C., Li Y. The potential toxicity of microplastics on human health. *Sci. Total. Environ.* 2024; 912: 168946. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168946>
24. Ali N., Katsouli J., Marczylo E.L., Gant T.W., Wright S., Bernardino de la Serna J. The potential impacts of micro- and nano plastics on various organ systems in humans. *EBioMedicine.* 2024; 99: 104901. <https://doi.org/10.1016/j.ebiom.2023.104901>
25. Blackburn K., Green D. The potential effects of microplastics on human health: What is known and what is unknown. *Ambio.* 2022; 51(3): 518–30. <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01589-9>
26. Zhang D., Wu C., Liu Y., Li W., Li S., Peng L., et al. Microplastics are detected in human gallstones and have the ability to form large cholesterol-microplastic heteroaggregates. *J. Hazard. Mater.* 2024; 467: 133631. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133631>
27. Martin-Folgar R., González-Caballero M.C., Torres-Ruiz M., Cañas-Portilla A.I., de Alba González M., Liste I., et al. Molecular effects of polystyrene nanoplastics on human neural stem cells. *PLoS One.* 2024; 19(1): e0295816. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295816>
28. Bonanomi M., Salmistraro N., Porro D., Pinsino A., Colangelo A.M., Gaglio D. Polystyrene micro and nano-particles induce metabolic rewiring in normal human colon cells: A risk factor for human health. *Chemosphere.* 2022; 303(Pt. 1): 134947. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134947>
29. Chen Z., Li Y., Xia H., Wang Y., Pang S., Ma C., et al. Chronic exposure to polystyrene microplastics increased the chemosensitivity of normal human liver cells via ABC transporter inhibition. *Sci. Total. Environ.* 2024; 912: 169050. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169050>

Сведения об авторах

Газеев Игорь Рамилевич, канд. с.-х. наук, доцент, декан факультета пищевых технологий, ФГБОУ ВО БашГАУ, 450001, Уфа, Россия. E-mail: gazeevigor@yandex.ru

Лукин Александр Анатольевич, канд. техн. наук, доцент, доцент каф. технического сервиса машин, оборудования и безопасности жизнедеятельности, ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ, 454080, Челябинск, Россия. E-mail: lukin3415@gmail.com

Гизатова Наталья Владимировна, канд. биол. наук, доцент, доцент каф. технологии мясных, молочных продуктов и химии, ФГБОУ ВО БашГАУ, 450001, Уфа, Россия. E-mail: Natgiz@yandex.ru

Латыпова Гульнара Флуровна, канд. биол. наук, доцент, зав. каф. безопасности жизнедеятельности и технологического оборудования, ФГБОУ ВО БашГАУ, 450001, Уфа, Россия. E-mail: g1311@mail.ru

Information about the authors

Igor R. Gazeev, PhD (Agriculture), associate professor, dean, Faculty of food technologies, Bashkir State Agrarian University, Ufa, 450001, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-2746-8634> E-mail: Igor gazeevigor@yandex.ru

Aleksandr A. Lukin, PhD (Engineering), associate professor, associate professor of the Department of Technical Service of Machines, Equipment and Life Safety, South Ural State Agrarian University, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-4753-3210> E-mail: lukin3415@gmail.com

Natalia V. Gizatova, PhD (Biology), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technology of Meat, Dairy Products and Chemistry, Bashkir State Agrarian University, Ufa, 450001, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-9222-767X> E-mail: Natgiz@yandex.ru

Gulnara F. Latypova, PhD (Biology), associate professor, head, the Department of life safety and technological equipment, Bashkir State Agrarian University, Ufa, 450001, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-9534-5946> E-mail: g1311@mail.ru