

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 504.5

ЗАГРЯЗНЕНИЕ МИКРОПЛАСТИКОМ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ УГРОЗЫ ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ ЧЕЛОВЕКА

Бурак Л.Ч., Писарик М.И., Богданов Н.П.

ООО «Белросаква», Минск, e-mail: leonidburak@gmail.com

Загрязнение микропластиком является глобальной экологической проблемой, вызывающей серьезную озабоченность. Цель статьи – критический обзор научных исследований анализа рисков загрязнения микропластиком окружающей среды и влияния микрочастиц пластика на здоровье человека. В качестве материалов исследования послужили научные статьи, опубликованные в период с 2018 по 2024 г. Поиск провели в научных базах данных PubMed, Scopus, Web of Science, Google Scholar. Научный поиск проводился с применением дескрипторов: «пластмасса», «микропластик», «нанопластик» «загрязнение», «влияние», «источник», «здоровье», «безопасность». Среди статей, соответствующих критериям включения, для составления данного обзора было выбрано 43 исследования. В ходе обзора установлено, что микропластик, который представляет собой пластиковые частицы размером менее 5 мм, широко распространен в нашей среде и возникает из различных источников, включая промышленные процессы, пластиковые изделия и в результате разложения более крупных пластиков. Микропластик встречается практически во всех абиотических (включая водные, наземные и атмосферные) и биотических (включая растения, животных и человека) экосистемах Земли. Недавняя пандемия коронавирусного заболевания COVID-19 способствовала увеличению спроса на одноразовые пластмассовые изделия, что повлекло рост объемов производства и количества образования отходов. Исследования показали, что эти частицы могут содержать вредные соединения и токсины, тем самым создавая возможные опасности для здоровья, включая гормональные нарушения, окислительный стресс и воспаление. Повреждение и воспаление легочной ткани, помимо респираторных проблем, таких как астма и хроническая обструктивная болезнь легких, связаны с воздействием микропластика при вдыхании. Необходимы принятие и реализация эффективных мер по снижению источников и количества загрязнения окружающей среды микропластиком. Кроме того, следует инвестировать в научные исследования и разработки, благодаря которым можно создавать и внедрять устойчивые и эффективные технологии по снижению загрязнения микропластиком окружающей среды и его влиянию на здоровье человека.

Ключевые слова: пластмасса, микропластик, загрязнение, источник, почва, вода, воздух, здоровье человека

MICROPLASTIC POLLUTION OF THE ENVIRONMENT AND POTENTIAL THREATS TO HUMAN HEALTH

Burak L.Ch., Pesarik M.I., Bogdanov N.P.

LLC Belrosakva, Minsk, e-mail: leonidburak@gmail.com

Microplastic pollution is a global environmental problem of serious concern. The purpose of the article is a critical review of scientific research on the analysis of the risks of microplastic pollution of the environment and the impact of microparticles of plastic on human health. The research materials were scientific articles published in the period from 2018 to 2024. The search was conducted in the scientific databases PubMed, Scopus and Web of Science and Google Scholar. The scientific search was carried out using the descriptors: “plastics”, “microplastics”, “nanoplastics”, “pollution”, “influence”, “source”, “health”, “safety”. Among the articles that meet the inclusion criteria, 43 studies were selected to compile this review. The review found that microplastics, which are plastic particles less than five millimeters in size, are widespread in our environment and arise from various sources, including industrial processes, plastic products and as a result of decomposition of larger plastics. Microplastics are found in almost all abiotic (including aquatic, terrestrial and atmospheric) and biotic (including plants, animals and humans) ecosystems of the Earth. The recent pandemic of the coronavirus disease COVID-19 has contributed to an increase in demand for disposable plastic products, which has led to an increase in production and waste generation. Studies have shown that these particles can contain harmful compounds and toxins, thereby creating possible health hazards, including hormonal disorders, oxidative stress and inflammation. Damage and inflammation of lung tissue, in addition to respiratory problems such as asthma and chronic obstructive pulmonary disease, are associated with exposure to microplastics when inhaled. It is necessary to take and implement effective measures to reduce the sources and amount of environmental pollution with microplastics. In addition, it is necessary to invest in research and development, through which it is possible to create and implement sustainable and effective technologies to reduce microplastic pollution of the environment and its impact on human health.

Keywords: plastics, microplastics, pollution, source, soil, water, air, human health

Микропластик (МП) – это мельчайшие частицы, полученные из пластика или синтетических, полусинтетических полимеров. Большинство пластмасс представляют собой полимеры, полученные из нефти. Эти полимеры, такие как полипропилен (ПП),

полиэтилен (ПЭ), поливинилхлорид (ПВХ), полиэтилентерефталат (ПЭТ) и полистирол (ПС), не поддаются биологическому разложению [1]. В связи с растущим объемом ежегодного производства и утилизации пластиковых изделий, ограниченной пере-

работкой и повторным использованием, а также длительной разлагаемостью материалов, загрязнение представляет собой серьезную экологическую проблему, решение которой требует системного и качественно-го подхода [2–4]. Пластик является широко используемым материалом в промышленности, и его производство с годами постоянно растет. В 2016 г. годовое производство пластика достигло 300 млн т. Однако, если эта тенденция сохранится, по оценкам, к 2050 г. будет произведено около 25 млн т пластиковых отходов [3]. Пластик является основным компонентом широкого спектра промышленных и потребительских товаров, включая косметику, моющие средства, краски, синтетические удобрения и пестициды. К сожалению, МП был обнаружен в различных пищевых продуктах, таких как обработанные пищевые продукты, пиво, морепродукты и безалкогольные напитки. Микропластик встречается практически во всех абиотических (включая водные, наземные и атмосферные) и биотических (включая растения, животных и человека) экосистемах Земли. Различные среды (атмосфера, гидросфера, суша и т.д.) являются взаимосвязанными и динамичными, в результате пластики переходят из одной системы в другую [5]. Кроме того, пластик взаимодействует с различными загрязнителями, такими как тяжелые металлы в почве, погодные условия, микроорганизмы, растительность и др. Важными параметрами в контексте взаимодействия являются тип пластика, его форма, размер, свойства поверхности (например, шероховатость) и другие механические свойства, а также физические свойства, а также химические, такие как добавки; пластмассы содержат множество элементов, химически не связанных с полимерной матрицей, таких как непрореагировавшие мономеры, остаточные технологические добавки [6–8]. Особо следует отметить, что существует реальная возможность, что эти мельчайшие частицы могут попадать в организм человека с пищей. Исследования показали, что микропластик присутствует в различных морепродуктах, включая моллюсков и рыбу, а также в соленой и питьевой воде [8–10]. Неоднократно подтверждено, что микропластик содержит множество опасных соединений и добавок, которые могут попасть в организм человека при употреблении [11]. Потенциальные неблагоприятные последствия этих химических веществ для здоровья человека включают нарушения гормонального баланса, репродуктивные осложнения и злокачественные новообразования. Кроме того, мизерные размеры микропластика облег-

чают его транспортировку через слизистую оболочку кишечника в систему кровообращения, где они могут распространиться на различные органы и ткани, нанося тем самым дополнительный ущерб организму человека.

Люди также могут подвергаться воздействию микропластика в процессе дыхания, поскольку эти мельчайшие частицы способны переноситься по воздуху и попадать в дыхательные пути. Исследования показали, что микропластик широко распространен в атмосфере, особенно в городских районах, характеризующихся плотным скоплением пластикового мусора [12]. Эти частицы могут накапливаться в легких и других органах после вдыхания, что приводит к респираторным заболеваниям и другим нарушениям в организме.

Угрозу для здоровья человека также представляет сельскохозяйственная продукция, загрязненная микропластиком. Наличие микропластика в поливной воде и почве может привести к усвоению этих частиц растениями [2, 13–14]. Следовательно, употребление в пищу фруктов и овощей может привести к попаданию микропластика в организм человека, тем самым усугубляя потенциальную опасность для здоровья, связанную с этими мельчайшими пластиковыми частицами. Целью статьи было провести критический обзор научных исследований анализа рисков загрязнения микропластиком окружающей среды и влияния микропластика на здоровье человека.

Материалы и методы исследования

Поиск научной литературы результатов исследований загрязнения микропластиком окружающей среды и его влияния на здоровье человека проводили в библиографических базах PubMed, Scopus, Web of Science, Google Scholar с применением дескрипторов: «пластмассы», «микропластик», «нанопластик» «загрязнение», «влияние», «источник», «здоровье», «безопасность». В качестве временных рамок для обзора научных публикаций был принят период с 2018 по 2024 г. Более ранние научные статьи изучали только при отсутствии новых публикаций по теме исследования. При выполнении работы применяли методы анализа, систематизации и обобщения. Изначально было отобрано и изучено 347 научных публикаций. Среди статей, соответствующих критериям включения, для составления данного обзора было выбрано 43 исследования.

Критерии включения и исключения для статей, подлежащих анализу, были следующими.

Критерии включения:

- 1) статья написана в период с 2018 по 2024 г.;
- 2) статья соответствует теме исследования;
- 3) типы анализируемых статей – оригинальные исследовательские статьи, обзорные статьи и краткие отчеты

Критерии исключения:

- 1) статья не соответствует теме данного обзора: не обсуждаются тематики источников загрязнения микропластиком окружающей среды и его влияния на здоровье человека;

- 2) содержание статьи дублируется. Если из разных баз данных или разных электронных библиотечных систем были извлечены повторяющиеся источники, их классифицировали только один раз.

Результаты исследования и их обсуждение

Источники и пути распространения микропластика

Чтобы определить эффективные методы по снижению воздействия микропластика на окружающую среду, важно понять его происхождение и пути распространения. Микропластик в основном образуется в результате разложения более крупных пластиковых предметов, включая, помимо прочего, бутылки, пакеты и упаковочные материалы. Эти предметы постепенно распадаются на более мелкие фрагменты, в итоге превращаясь в микропластик, который легко переносится ветром и водными течениями. Еще одним источником распространения микропластика является удаление синтетических волокон из текстиля и одежды в процессе стирки. Ввиду крошечного размера эти волокна не задерживаются системами фильтрации на очистных сооружениях и в итоге попадают в реки и океаны. Кроме того, микропластик образуется в результате разложения пластиковых шариков и микрошариков, которые используются в предметах личной гигиены, включая зубную пасту и очищающие средства для лица [4].

Мельчайшие частицы пластика, часто смываемые в канализацию, попадают в водные пути, где могут потребляться морскими организмами. Кроме того, микропластик может также образовываться в результате повреждения рыболовного снаряжения, включая сети и веревки. Микропластик, попав в окружающую среду, может перемещаться на большие расстояния ветром и водными течениями, тем самым распространяя загрязнение в отдаленные регионы.

Реки и ручьи транспортируют микропластик в океан, где он накапливается на пляжах и в прибрежных районах. Более того, перенос микропластика из океана в атмосферу через морские брызги может привести к загрязнению наземных экосистем. Также во время выпадения осадков микропластик может переноситься из городской среды в реки и озера по ливневым каналам, поэтому загрязнение микропластиком может затронуть даже удаленные от побережья регионы, не имеющие выхода к морю. В результате атмосферных осадков микропластик может переноситься из городов в сельские и отдаленные регионы. Распространенные источники частиц микропластика можно разделить на две категории: первичный и вторичный микропластик. Первичный микропластик – это микронные пластиковые частицы, производимые промышленностью, а вторичный микропластик – это пластиковые частицы, образующиеся в результате физической и химической фрагментации и разложения крупных пластиков. Разнообразие путей образования и перемещения микропластика в атмосфере подчеркивает взаимозависимость различных экосистем и необходимость разработки комплексной стратегии по борьбе с пластиковым загрязнением [15]. Кроме того, способы распространения микропластика в окружающей среде подтверждают необходимость международного сотрудничества в решении проблемы пластикового загрязнения.

Основные пути снижения образования и распространения микропластика должны включать в себя введение запрета на одноразовый пластик, внедрение биоразлагаемых материалов, а также совершенствование инфраструктуры переработки и управления отходами. Помимо информирования общественности об опасностях пластикового загрязнения, необходима система мотивации населения, которая будет способствовать сокращению потребления пластиковых изделий.

Влияние микропластика на здоровье человека

Как уже отмечалось, микропластик присутствует во всех аспектах окружающей среды, включая пищу, которую мы потребляем, и воздух, которым мы дышим. Основным источником воздействия частиц микропластика и нанопластика является употребление в пищу продуктов питания или воды, загрязненных этими частицами. Пластмассы попадают в пищевую цепь и несут в себе загрязняющие вещества, которые могут повлиять

на гомеостаз кишечника. В ходе исследований установлено наличие микропластика и нанопластика во многих видах пищевых продуктов, включая фрукты, овощи, морские продукты, домашний скот (например, куры) и питьевую воду. Было обнаружено, что многие продукты, такие как сахар, мед, пиво, коровье молоко и морская соль, также содержат микропластик. Эти частицы были обнаружены в желудочно-кишечном содержимом более чем 220 различных морских видов, таких как мидии, устрицы, моллюски и обыкновенные креветки, а также в различных морепродуктах [16–18]. Сообщается, что взрослые люди потенциально могут проглатывать до 458000 частиц микропластика в год через водопроводную воду и 3569000 частиц микропластика в год через воду в бутылках [19]. Однако существуют значительные расхождения в оценках воздействия микропластика на человека из-за различий в типе пластика и экспериментальных методологиях, используемых в различных исследованиях. В недавнем исследовании Schawabl et al. предприняли попытку оценить загрязнение человека, измеряя количество микропластика в фекалиях восьми здоровых людей. Исследованием установлено в среднем 20 частиц микропластика на 10 г фекалий размером от 50 до 500 мкм, принадлежащие к девяти типам пластиков, из которых наиболее распространены ПП и ПЭТ [20, 21].

Распределение микро- и нанопластиков после приема внутрь недостаточно изучено. Из-за стабильности пластиковых материалов ферментативная или химическая деградация затруднена, в особенности по причине того, что в кишечнике млекопитающих отсутствуют специализированные ферменты для разрушения пластика. Поэтому частицы пластика разлагаются в процессе пищеварения незначительно. Более крупные микропластики (> 150 мкм) остаются прикрепленными к слою кишечной слизи, непосредственно контактируя с апикальной частью эпителиальных клеток кишечника. Однако более мелкие частицы (< 150 мкм) могут проникать через слой слизи кишечника. Поглощение микро- и нанопластиков зависит от их размера и происходит посредством различных механизмов, включая транзитоз через клетки микроскладок, эндоцитоз через энтероциты, персорбцию (прохождение через щели на конце ворсинки после гибели энтероцитов) и параклеточное поглощение [22].

При попадании микро- и нанопластиков в организм большая их часть выводится с калом, тогда как небольшая часть остается в кишечнике в течение нескольких

дней. Микрочастицы могут вызывать воспаление, окислительный стресс и нарушение микробиома кишечника при всасывании в организм. Это может привести среди прочего к ослаблению иммунной системы, сердечно-сосудистым заболеваниям и желудочно-кишечным заболеваниям. Помимо попадания микропластика с пищей организм человека может подвергаться воздействию микропластика в процессе дыхания. Установлено, что воздух, которым мы дышим, содержит микропластик, особенно в помещениях, где преобладают синтетические материалы. Согласно научным исследованиям, повреждение и воспаление легочной ткани, помимо респираторных проблем, таких как астма и хроническая обструктивная болезнь легких, связаны с воздействием микропластика в воздухе. Многочисленные пластмассы содержат соединения, включая, помимо прочего, фталаты, бисфенол А (BPA) и антипирены, которые вызывают различные осложнения для здоровья, включая рак, гормональные нарушения и репродуктивные проблемы [18].

Более того, исследования показали, что микропластик служит переносчиком вредных бактерий и патогенов. Биопленки, образованные бактериями, прилипающими к поверхности частиц микропластика, могут способствовать передаче инфекционных заболеваний [23]. Присутствие микропластика в окружающей среде также может оказывать неблагоприятное воздействие на безопасность пищевых продуктов [6, 19]. Более того, загрязнение сельскохозяйственных почв микропластиком влечет за собой нарушение усвоения питательных веществ и развитие сельскохозяйственных культур, что, в свою очередь, снижает производство продуктов питания и ставит под угрозу продовольственную безопасность. В связи с этим растет и потребность в дополнительном регулировании и исследованиях воздействия микропластика на здоровье человека [24–29].

Разложение пластиковых бутылок и контейнеров на более мелкие частицы способствует попаданию микропластика в питьевую воду. Кроме того, эти частицы могут образовываться при стирке одежды из синтетических волокон, а также добавление микропластика в такие продукты, как чистящие средства и косметика, может привести к их последующему накоплению в системе водоснабжения.

Следует отметить, что незначительные размеры микропластика облегчают его прохождение через системы фильтрации воды, что затрудняет его полное удаление из питьевой воды [30]. В связи с этим необхо-

димо также совершенствовать процессы очистки воды, с целью полного удаления микропластика из источников питьевого водоснабжения.

Микропластик был идентифицирован как загрязнитель воздуха и почвы, а также океанов и водных путей. Как ранее отмечалось, микрочастицы пластика способны перемещаться на большие расстояния, попадая в атмосферу, прежде чем осесть на суше или в водоемах, а также способны накапливаться в телах почвенных организмов, червей и насекомых.

Исследователи из Университета Стратклайда обнаружили микропластик в атмосферных частицах, собранных для исследования в Лондоне [31, 32]. В ходе исследования были изучены образцы, полученные из разных мест муниципалитета, и установлено, что в них микропластик составляет до 60%. Установлено, что большую часть микропластика составляют нити и фрагменты. Эти компоненты преобладают в пластиковых изделиях, которые используются ежедневно, включая одежду, упаковку и предметы личной гигиены. Перенос этих частиц на большие расстояния ветром и водными течениями может привести к обширному загрязнению экосистем [33, 34].

Микропластик может изменить физический состав почвы, тем самым влияя на доступность питательных веществ, способность удерживать воду и пористость. Это может иметь пагубные последствия для роста и развития растений, что в итоге приведет к снижению сельскохозяйственного производства и ухудшению качества почвы [2, 35, 36]. Кроме того, микропластик может служить средой для переноса дополнительных загрязнителей почвы, включая органические загрязнители и тяжелые металлы, тем самым усугубляя деградацию качества почвы. Важно отметить, что дождевые черви, которые являются жизненно важными инженерами экосистемы в почве, могут поглощать микропластик, что пагубно влияет на их размножение и здоровье. Исследование показало, что микропластик может проникать в растения через корни, вызывая физиологические изменения [37]. В результате такого влияния на здоровье растений, усвоение питательных веществ и рост снижается урожайность сельскохозяйственных культур. Микропластик проявляет устойчивость к воздействию окружающей среды по сравнению со многими другими загрязнителями и способен сохраняться в почве от нескольких сотен до трех тысяч лет [38]. Длительная продолжительность такого сохранения повышает вероятность того, что он будет постепенно накапливаться в почве, тем са-

мым создавая возможность биоаккумуляции и биомагнификации в пищевой цепи. Это не только ставит под угрозу здоровье почвы и функционирование экосистем, но также подвергает риску здоровье людей из-за употребления в пищу загрязненных пищевых культур. Кроме того, накопление микропластика в почве может иметь последствия для экосистемных процессов, включая секвестрацию углерода, фильтрацию воды и сохранение биоразнообразия.

С целью снижения нахождения микропластика в почве необходима комплексная стратегия, включающая в себя разработку технологий удаления микропластика из почвы и восстановление почвы, совершенствование методов управления отходами и предотвращения пластикового загрязнения. Для разработки эффективных мер снижения необходимо доскональное изучение процессов переноса микропластика в почве, а также их воздействия на здоровье почвы и функционирование экосистемы.

Принимаемые меры по снижению загрязнения микропластиком и существующие проблемы

Крошечные пластиковые частицы, известные как микрошарики, включают в такие продукты, как отшелушивающие очищающие средства и зубная паста. С целью снижения загрязнения окружающей среды во многих странах, включая Канаду и США, запрещено использование микрогранул в продуктах личной гигиены. Некоторые страны ввели определенные правила использования микропластика кроме микрогранул также и в других продуктах. Так, например, Европейский Союз запретил использование микропластика в моющих средствах, косметике и других потребительских товарах.

В РФ и РБ принимаются меры по регулированию распространения пластиковых отходов с целью предотвращения выбросов микропластика в экосистему. На законодательном уровне приняты правила по обращению с пластиковыми отходами, включая ограничения на одноразовый пластик, раздельное хранение отходов и программу их переработки. Принимаемые меры направлены на снижение загрязнения окружающей среды посредством надлежащего управления и утилизации пластиковых отходов.

Небольшие размеры и широкое присутствие микропластика в окружающей среде являются существенным препятствием для их мониторинга. Из-за крошечных размеров микропластика традиционные методы мониторинга не обеспечивают его точное обнаружение и количественную

оценку. В настоящее время анализ микропластика часто требует трудоемких и длительных процедур, таких как микроскопия или спектроскопия, которые ограничивают эффективность мониторинга. Более того, широкое распространение микропластика в различных средах, включая отложения, организмы и водоемы, усложняет мониторинг и затрудняет всестороннюю оценку его присутствия в окружающей среде. Дополнительным препятствием в надзоре и выполнении правил, касающихся микропластика, является отсутствие стандартизированных методов обнаружения и количественного определения. В настоящее время отсутствие общепринятых методов анализа микропластика затрудняет сопоставимость данных разных исследований и регионов. Необходимо разработать и утвердить стандартизированные методы мониторинга микропластика, чтобы повысить точность и надежность данных о загрязнении микропластиком, а также облегчить принятие обоснованных решений.

Трудности в эффективном осуществлении нормативных актов и проведении комплексных программ мониторинга усугубляются отсутствием надлежащего финансирования, ресурсов и опыта [39, 40]. Недостаток возможностей многих стран по созданию устойчивых систем мониторинга микропластика приводит к недостаткам как в сборе данных, так и в охвате мониторинга. Кроме того, эффективное снижение последствий загрязнения микропластиком требует международного сотрудничества и координации из-за его трансграничных характеристик, что усложняет мониторинг и меры по обеспечению правоприменения.

Также мониторинг загрязнения микропластиком и снижение его экологических последствий затрудняет перенос микрочастиц на большие расстояния океанскими течениями и атмосферными процессами. Усилия по мониторингу и регулированию распространенности микропластика в окружающей среде еще больше усложняются его стойкостью и биоаккумуляцией в морских экосистемах [41].

Достижение эффективности в реализации нормативных актов, касающихся микропластика, требует комплексной стратегии, включающей научные исследования, формулирование политики и активное участие соответствующих сторон. Правительства, исследовательские институты, промышленность и неправительственные организации должны работать сообща по достижению действенных мер регулирования. Необходимо инвестировать в исследования и инновации для разработки передовых тех-

нологий мониторинга. Совершенствование нормативно-правовой базы и механизмов обеспечения соблюдения имеет решающее значение для снижения негативного воздействия микропластика на здоровье человека и окружающую среду путем устранения источников распространения загрязнений микропластиком.

Технологическим достижением, которое демонстрирует значительные перспективы в области удаления микропластика, является создание специализированных систем фильтрации [42]. С помощью различных механизмов фильтрации, включая сетчатые фильтры, сита и мембраны, удаляют микропластик из источников воды. Широкое внедрение систем фильтрации позволит снизить попадание микропластика в окружающую среду.

Современные технологии удаления микропластика предполагают внедрение роботизированных механизмов и устройств. Камеры и датчики, установленные на этих роботах, позволяют им обнаруживать и собирать микропластик из водоемов. Некоторые роботы спроектированы так, чтобы функционировать независимо, тогда как другими можно управлять дистанционно. Эти автономные устройства способны преодолевать труднопроходимую местность и покрывать огромные территории, чтобы обеспечить доступ до самых загрязненных микропластиком регионов. В настоящее время ученые исследуют возможности биологических методов, создание микроорганизмов, способных перерабатывать микропластик до безопасных побочных продуктов. Хотя эта технология в настоящее время находится на начальном этапе разработки, она имеет широкие перспективы. С целью удаления микропластика, помимо систем фильтрации, роботизированных устройств и биологических решений в настоящее время исследуются и другие технологические инновации. Проводятся научные исследования по применению нанотехнологий, разработке наноразмерных материалов, способных улавливать и удалять микропластик из воды [43, 44]. Альтернативные методы, которые изучаются, включают использование акустических вибраций или ультрафиолетового света.

Разработка и внедрение технологических инноваций, направленных на снижение загрязнения микропластиком, имеет первостепенное значение для защиты здоровья человека и окружающей среды. Инвестируя в исследования и разработки, возможно создание более устойчивых и эффективных методов устранения загрязнения микропластиком.

Заключение

Загрязнение микропластиком представляет серьезную угрозу для окружающей среды и здоровья человека. Значительные количества мельчайших пластиковых частиц присутствуют в почве, воде и даже воздухе, которым мы дышим. Последствия микропластика для здоровья человека сложны и разнообразны. В связи с этим для реализации стратегий по снижению загрязнения микропластиком и его негативного влияния необходимо сотрудничество и усилия всех заинтересованных сторон, потребителей, научного сообщества, промышленности и государственных органов. Необходимо проведение дальнейших научных исследований, чтобы всесторонне понять влияние микропластика на здоровье человека и разработать эффективные подходы к уменьшению его присутствия в окружающей среде. С этой целью следует реализовать действенные меры по сокращению использования пластиковых изделий и совершенствованию методологий управления отходами, законодательно ограничить включение микрогранул в средства личной гигиены и обеспечить соблюдение правил, снижающих выбросы микропластика при производстве текстиля.

Необходимы разработка и реализация комплексной стратегии, которая включает в себя минимизацию выбросов пластиковых отходов в окружающую среду, совершенствование процедур управления отходами и переработки, а также разработку и применение экологических материалов, заменяющих пластиковые изделия.

Список литературы

1. Jadaun J.S. Biodegradation of plastics for sustainable environment // *Bioresource Technology*. 2022. Vol. 347. P. 126697. DOI: 10.1515/pac-2018-0602.
2. Arp H.P., Kühnel D., Rummel C., MacLeod M., Pothoff A., Reichelt S., Rojo-Nieto E., Schmitt-Jansen M., Sonnenberg J., Toorman E., Jahnke A. Weathering plastics as a planetary boundary threat: exposure, fate, and hazards // *Environmental science & technology*. 2021. Vol. 55 (11). P. 7246–7255. DOI: 10.1021/acs.est.1c01512.
3. Wright S.L. Atmospheric microplastic deposition in an urban environment and an evaluation of transport // *Environmental international*. 2020. Vol. 136. P. 105411. DOI: 10.1016/j.envint.2019.105411.
4. Бурак Л.Ч., Ермошина Т.В., Королева Л.П. Загрязнение почвенной среды микропластиком, факторы влияния и экологические риски // *Экология и промышленность России*. 2023. Т. 27, № 5. С. 58–63. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-5-58-63.
5. Su L. Global transportation of plastics and microplastics: A critical review of pathways and influences // *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 831. P. 154884. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.154884.
6. Persson L., Carney Almroth B.M., Collins C.D., Cornell S., Hauschild M.Z. Outside the safe operating space of the

planetary boundary for novel entities // *Environ. Sci. Technol*. 2022. Vol. 56 (3). P. 1510–1521. DOI: 10.1021/acs.est.1c04158.

7. Bethanis J., Golia E.E. Revealing the combined effects of microplastics, Zn, and Cd on soil properties and metal accumulation by leafy vegetables: a preliminary investigation by a laboratory experiment // *Soil Systems*. 2023. Vol. 7. P. 65. DOI: 10.3390/soilsystems7030065.

8. Yang Y., Xie E., Du Z., Peng Z., Han Z., Li L., Zhao R., Yang X. Detection of various microplastics in patients undergoing cardiac surgery // *Environ. Sci. Technol*. 2023. Vol. 57. P. 10911–10918 DOI: 10.1021/acs.est.2c07179.

9. Rochman C.M., Hoellein T. The global odyssey of plastic pollution // *Science*. 2020. Vol. 368. P. 1184–1185 DOI: 10.1126/science.abc4428.

10. Ziani K., Ioniță-Mândrican C.B., Mititelu M., Neacșu S.M., Negrei C., Moroșan E., Drăgănescu D., Preda O.T. Microplastics: A real global threat for environment and food safety: A state of the art review // *Nutrients*. 2023. Vol. 15 (3). P. 617. DOI: 10.3390/nu15030617.

11. Alberghini L., Truant A., Santonicola S., Colavita G., Giaccone V. Microplastics in fish and fishery products and risks for human health: A review // *Int J Environ Res Public Health*. 2022. Vol. 20 (1). P. 789. DOI: 10.3390/ijerph20010789.

12. Campanale C., Massarelli C., Savino I., Locaputo V., Uricchio V.F. A detailed review study on potential effects of microplastics and additives of concern on human health // *Int J Environ Res Public Health*. 2020. Vol. 17 (4). P. 1212. DOI: 10.3390/ijerph17041212.

13. Lamichhane G., Acharya A., Marahatha R., Modi B., Paudel R., Adhikari A., Raut B.K., Aryal S., Parajuli N. Microplastics in environment: Global concern, challenges, and controlling measures // *Int J Environ Sci Technol (Tehran)*. 2023. Vol. 20. P. 4673–4694. DOI: 10.1007/s13762-022-04261-1.

14. Pironti C., Ricciardi M., Motta O., Miele Y., Proto A., Montano L. Microplastics in the environment: Intake through the food web, human exposure and toxicological effects // *Toxics*. 2021. Vol. 9. P. 224. DOI: 10.3390/toxics9090224.

15. Emenike E.C., Okorie C.J., Ojeyemi T., Egbemhenge A., Iwuozor K.O., Saliu O.D., Okoro H.K., Adeniyi A.G. From oceans to dinner plates: The impact of microplastics on human health // *Heliyon*. 2023. Vol. 9(10). P. e20440. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e20440.

16. Bashir S.M., Kimiko S., Mak C.W., Fang J.K.H., Gonçalves D. Personal care and cosmetic products as a potential source of environmental contamination by microplastics in a densely populated Asian city // *Front Mar Sci*. 2021. Vol. 8. P. 683482. DOI: 10.3389/fmars.2021.683482.

17. Kutralam-Muniasamy G. et al. Branded milks – Are they immune from microplastics contamination? // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 714. P. 136823. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136823.

18. Jung Y.S., Sampath V., Prunicki M., Aguilera J., Allen H., LaBeaud D., Veidis E., Barry M., Emy B., Patel L., Akdis C., Akdis M., Nadeau K. Characterization and regulation of microplastic pollution for protecting planetary and human health // *Environ Pollut*. 2022. Vol. 315. P. 120442. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.120442.

19. Danopoulos E., Twiddy M., Rotchell J.M. Microplastic contamination of drinking water: A systematic review // *PLoS one*. 2020. Vol. 15. P. e0236838.

20. Van Raamsdonk L.W.D. et al. Current insights into monitoring, bioaccumulation, and potential health effects of microplastics present in the food chain // *Foods*. 2020. Vol. 9 (1). P. 72. DOI: 10.3390/foods9010072.

21. Sacco N.A., Zoppas F.M., Devard A., González Muñoz M.d.P., García G., Marchesini F.A. Recent advances in microplastics removal from water with special attention given to photocatalytic degradation: Review of scientific research // *Microplastics*. 2023. Vol. 2 (3). P. 278–303. DOI: 10.3390/microplastics2030023.

22. Ullah S., Ahmad S., Guo X., Ullah S., Ullah S., Nabi G., Wanghe K. A review of the endocrine disrupting effects of micro and nano plastic and their associated chemicals in mammals // *Front Endocrinol (Lausanne)* 2023. Vol. 13. P. 1084236. DOI: 10.3389/fendo.2022.1084236.
23. Gruber E.S., Stadlbauer V., Pichler V., Resch-Fauster K., Todorovic A., Meisel T.C., Trawoeger S. To waste or not to waste: Questioning potential health risks of micro- and nano-plastics with a focus on their ingestion and potential carcinogenicity // *Expo Health* 2023. Vol. 15. P. 33–51. DOI: 10.1007/s12403-022-00470-8.
24. Lee Y., Cho J., Sohn J., Kim C. Health effects of microplastic exposures: Current issues and perspectives in South Korea // *Yonsei Med J* 2023. Vol. 64 (5). P. 301–308. DOI: 10.3349/ymj.2023.0048.
25. Lu K., Zhan D., Fang Y., Li L., Chen G., Chen S., Wang L. Microplastics, potential threat to patients with lung diseases // *Front Toxicol* 2022. Vol. 4. P. 958414. DOI: 10.3389/ftox.2022.958414.
26. Khan F.R., Catarino A.I., Clark N.J. The ecotoxicological consequences of microplastics and co-contaminants in aquatic organisms: A mini-review // *Emerg Top Life Sci* 2022. Vol. 6. P. 339–348. DOI: 10.1042/ETLS20220014.
27. Usman S., Abdull Razis A.F., Shaari K., Amal M.N., Ibrahim M.A. Microplastics pollution as an invisible potential threat to food safety and security, policy challenges and the way forward // *Int J Environ Res Public Health* 2020. Vol. 17 (24). P. 9591. DOI: 10.3390/ijerph17249591.
28. Yee M.S., Hii L.W., Looi C.K., Lim W.M., Wong S.F., Kok Y.Y., Tan B.K., Wong C.Y. Impact of microplastics and nanoplastics on human health // *Nanomaterials (Basel)* 2021. Vol. 11 (2). P. 496. DOI: 10.3390/nano11020496.
29. Bhat M.A., Gedik K., Gaga E.O. Atmospheric micro (nano) plastics: Future growing concerns for human health // *Air Qual Atmos Health* 2023. Vol. 16. P. 233–262. DOI: 10.1007/s11869-022-01272-2.
30. Morrison M., Trevisan R., Ranasinghe P., Merrill G.B., Santos J., Hong A., Edward W.C., Somarelli J.A. A growing crisis for One Health: Impacts of plastic pollution across layers of biological function // *Front Mar Sci* 2022. Vol. 9. P. 980705. DOI: 10.3389/fmars.2022.980705.
31. Bhuyan M.S. Effects of microplastics on fish and in human health // *Front Environ Sci* 2022. Vol. 10. P. 827289. DOI: 10.3389/fenvs.2022.827289.
32. Brown E., MacDonald A., Allen D. The potential for a plastic recycling facility to release microplastic pollution and possible filtration remediation effectiveness // *J. Hazard Mat Adv* 2023. Vol. 10. P. 100309. DOI: 10.1016/j.hazadv.2023.100309.
33. Haque F., Fan C. Fate of microplastics under the influence of climate change // *iScience* 2023. Vol. 26 (9). P. 107649. DOI: 10.1016/j.isci.2023.107649.
34. Jia L., Liu L., Zhang Y., Fu W., Liu X., Wang Q., Huang L. Microplastic stress in plants: Effects on plant growth and their remediations // *Front Plant Sci* 2023. Vol. 14. P. 1226484. DOI: 10.3389/fpls.2023.1226484.
35. Huang D., Wang X., Yin L., Chen S., Tao J., Zhou W., Chen H., Zhang G., Xiao R. Research progress of microplastics in soil-plant system: Ecological effects and potential risks // *Sci Total Environ* 2022. Vol. 812. P. 151487. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.151487.
36. Li Y., Hou Y., Hou Q., Long M., Wang Z., Rillig M.C., Liao Y. Soil microbial community parameters affected by microplastics and other plastic residues // *Front Microbiol* 2023. Vol. 14. P. 125860. DOI: 10.3389/fmicb.2023.1258606.
37. Roy T., Dey T.K., Jamal M. Microplastic/nanoplastic toxicity in plants: An imminent concern // *Environ Monit Assess* 2022. Vol. 195 (1). P. 27. DOI: 10.1007/s10661-022-10654-z.
38. Prata J.C., Dias-Pereira P. Microplastics in terrestrial domestic animals and human health: Implications for food security and food safety and their role as sentinels // *Animals (Basel)* 2023. Vol. 13 (4). P. 661. DOI: 10.3390/ani13040661.
39. Yang H., Chen G., Wang J. Microplastics in the marine environment: Sources, fates, impacts and microbial degradation // *Toxics* 2021. Vol. 9. P. 41. DOI: 10.3390/toxics9020041.
40. Nasir M.S., Tahir I., Ali A., Ayub I., Nasir A., Abbas N., Sajjad U., Hamid K. Innovative technologies for removal of micro plastic: A review of recent advances // *Heliyon* 2024. Vol. 10 (4). P. e25883. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e25883.
41. Li W., Wang J., Xiong Z., Li D. Micro/nanorobots for efficient removal and degradation of micro/nanoplastics // *Cell Reports Physical Science* 2023. Vol. 4 (11). P. 101639. DOI: 10.1016/j.xcrp.2023.101639.
42. Anand U., Dey S., Bontempi E., Ducoli S., Vethaak A.D., Dey A., Federici S. Biotechnological methods to remove microplastics: A review // *Environ Chem Lett* 2023. Vol. 21 (3). P. 1787–1810. DOI: 10.1007/s10311-022-01552-4.
43. Rashed A.H., Yesilay G., Hazeem L., Rashdan S., Al-Mealla R., Kilinc Z., Abdulrasool F., Kamel A.H. Micro- and nano-plastics contaminants in the environment: Sources, fate, toxicity, detection, remediation, and sustainable perspectives // *Water* 2023. Vol. 15 (20). P. 3535. DOI: 10.3390/w15203535.