

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-394-402>

Поступила 26.03.2024

Поступила после рецензирования 27.08.2024

Принята в печать 02.09.2024

© Мяленко Д. М., 2024



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

Обзорная статья

Open access

МИКРОПЛАСТИКИ: ОСОБЕННОСТИ ПОЯВЛЕНИЯ, МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ (ПРЕДМЕТНЫЙ ОБЗОР)

Мяленко Д. М.

Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности, Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

полимерные материалы, микропластик, идентификация, биоразлагаемая упаковка

Полимерные упаковочные материалы стали неотъемлемой частью нашей жизни — они используются в производстве предметов быта, в фармацевтике, в химической и в автомобильной отрасли. Производство и применение полимерной упаковки стремительно расширяются, охватывая различные сферы промышленности. По данным Plastics Europe Market Research Group (PEMRG), мировое производство пластмасс достигло 348 миллионов тонн в 2017 году и, вероятно, достигнет 33 миллиардов тонн к 2050 году. При этом ежегодно на территории Европейского союза (ЕС) образуется около 26 миллионов тонн пластиковых отходов, из которых только 30% поступает на вторичную обработку. Несмотря на это, во многих странах мира, в том числе в России, более 50% полимерных материалов утилизируются на полигонах, где под воздействием внешних факторов окружающей среды (температура, влажность) происходит ее разрушение с образованием большого количества микро- и нанопластиков. Большинство людей не считают экологические проблемы, связанные с микропластиком, серьезными. Однако многие работы, направленные на глубокое изучение данной проблемы, доказали, что микро- и нанопластик оказывают значительное негативное воздействие на наземных и морских животных, а также на здоровье человека, будь то прямо или косвенно. Идентификация микропластиков в различных модельных средах и живых системах, как правило, основана на использовании инфракрасной спектроскопии и рамановской спектроскопии. Каждый из методов имеет свои достоинства и недостатки, связанные в основном с пробоподготовкой для повышения точности идентификации. Настоящий обзор посвящен проблеме образования и идентификации микропластиков в различных природных объектах.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Статья подготовлена в рамках выполнения НИР по государственному заданию (шифр № FNSS-2022–0005) «Развитие научных принципов глубокой переработки и обеспечения длительного хранения молочного сырья и продукции с применением малоотходных ресурсосберегающих технологий» Всероссийского научно-исследовательского института молочной промышленности.

Received 26.03.2024

Accepted in revised 27.08.2024

Accepted for publication 02.09.2024

© Myalenko D. M., 2024

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

Review article

Open access

MICROPLASTICS: FEATURES OF APPEARANCE, IDENTIFICATION METHODS (SUBJECT REVIEW)

Dmitry M. Myalenko

All-Russian Dairy Research Institute, Moscow, Russia

KEY WORDS:

polymer materials, microplastics, identification, biodegradable packaging

ABSTRACT

Polymer packaging materials have become firmly embedded in our way of life. They are used in the manufacture of household items, as well as in the pharmaceutical, chemical, and automotive industries. Production and application of polymer packaging are expanding rapidly encompassing various spheres of the industry. According to Plastics Europe Market Research Group (PEMRG), global plastics production reached 348 million tons in 2017 and is likely to reach 33 billion tons by 2050. At the same time, about 26 million tons of plastic waste are generated annually on the territory of the European Union (EU), of which only 30% is collected for recycling. Despite this, in many countries of the world, including Russia, more than 50% of polymer materials are disposed of at landfills, where under the influence of external environmental factors (temperature, humidity), their destruction occurs with the formation of huge quantities of micro- and nanoplastics. Most people do not consider the environmental problems associated with microplastics to be serious. However, many studies aimed at in-depth study of this problem have proved that micro- and nanoplastics have significant negative effects on terrestrial and marine animals, as well as on human health, whether directly or indirectly. The identification of microplastics in various model environments and living systems is usually based on the use of infrared spectroscopy and Raman spectrophotometry. Each of the methods has its advantages and disadvantages, mainly related to sample preparation to improve the accuracy of identification. This review is devoted to the problem of formation and identification of microplastics in various natural objects.

FUNDING: The article was prepared as part of research on the state task of Research and Development No. FNSS-2022–0005 “Development of scientific principles of deep processing and long-term storage of dairy raw materials and products using low-waste resource-saving technologies” of the All-Russian Dairy Research Institute.

1. Введение

Полимерные материалы находят применение не только в качестве упаковки, но и в производстве предметов быта, в фармацевтике, в химической и автомобильной промышленности. Темпы роста производства и использования полимеров неуклонно растут. Так, по данным Plastics Europe Market Research Group (PEMRG), если в 2017 году мировой объем производства пластмасс достигал

348 миллионов тонн, то к 2050 году он может превысить 33 миллиарда тонн.

Ежегодно в Европейском союзе (ЕС) образуется порядка 26 миллионов тонн пластиковых отходов, и лишь 30% из них подвергаются вторичной переработке [1]. Это обостряет глобальную проблему переработки и утилизации значительных объемов полимерных отходов [2,3], образующихся после окончания жизненного цикла

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мяленко Д. М. (2024). Микропластики: особенности появления, методы идентификации (предметный обзор). *Пищевые системы*, 7(3), 394–402. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-394-402>

FOR CITATION: Myalenko, D. M. (2024). Microplastics: Features of appearance, identification methods (subject review). *Food Systems*, 7(3), 394–402. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-394-402>

пищевой упаковки и оказывающих негативное воздействие на окружающую среду [4].

В поисках оптимальных решений экологической проблемы утилизации упаковки мировое научное сообщество выделяет три основных направления: совершенствование малоотходных технологий производства [2], использование биоразлагаемых материалов и композитов на их основе [3], а также модернизация систем сбора, сортировки и переработки отходов, включая применение отходов полимерного производства в качестве вторичного сырья [9,10]. Однако, несмотря на это, во многих странах мира, в том числе в России, более 50% полимерных материалов утилизируются на полигонах, где под воздействием внешних факторов окружающей среды (температура, влажность) происходит разрушение полимерных материалов с образованием большого количества микро- и нанопластиков.

Прогресс не всегда бережен к природе и человеческому здоровью. Обилие поступающих загрязнителей в окружающую среду негативно влияет на жизнедеятельность растений, животных и людей. Грамотное обращение с отходами и экологическая осведомленность населения планеты позволит уменьшить давление на природу, однако не ликвидирует его. Частицы загрязнителей, такие как микропластики, имеют множественные источники происхождения, из-за чего их количество в природе накапливается и способствует глобальному распространению. Питьевая вода после прохождения очистительных систем также содержит небольшое количество микропластика. Современные исследования не способны составить полную картину распространения микропластика, однако даже по разрозненным данным понятно, что данная проблема требует немедленного реагирования. Контроль источников микропластика и очистка загрязненных территорий способствует решению проблемы загрязнения окружающей среды.

Во многих странах были введены законодательные меры по регулированию количества микропластика. Например, в США использование микропластика в косметической продукции с 2017 года запрещено. Также государства ограничивают потребление одноразовых пластмасс, в основном соломинок и пластиковых пакетов [4]. Евросоюз применяет комбинированный подход к проблеме: просветительская деятельность, стимулирование сокращения производства пластиковой упаковки в пользу использования переработанных

полимеров, а также законодательное регулирование обращения с отходами [11,12,13,14].

Развитие отрасли биоразлагаемых полимерных материалов способствует сокращению попадающего в окружающую среду пластика, однако на сегодняшний день доля таких материалов в общем объеме упаковки мала. Высокая стоимость таких полимеров значительно препятствует их повсеместному распространению, поэтому для полноценного перехода мирового производства на биоматериалы необходимы инвестиции и финансовая поддержка правительства.

Большинство людей не считают экологические проблемы, связанные с распространением микропластика, серьезными [15,16]. Однако многие работы, направленные на глубокое изучение данной проблемы, доказали, что микро- и нанопластик оказывают значительное негативное воздействие на наземных и морских животных, а также на здоровье человека, будь то прямо или косвенно [17].

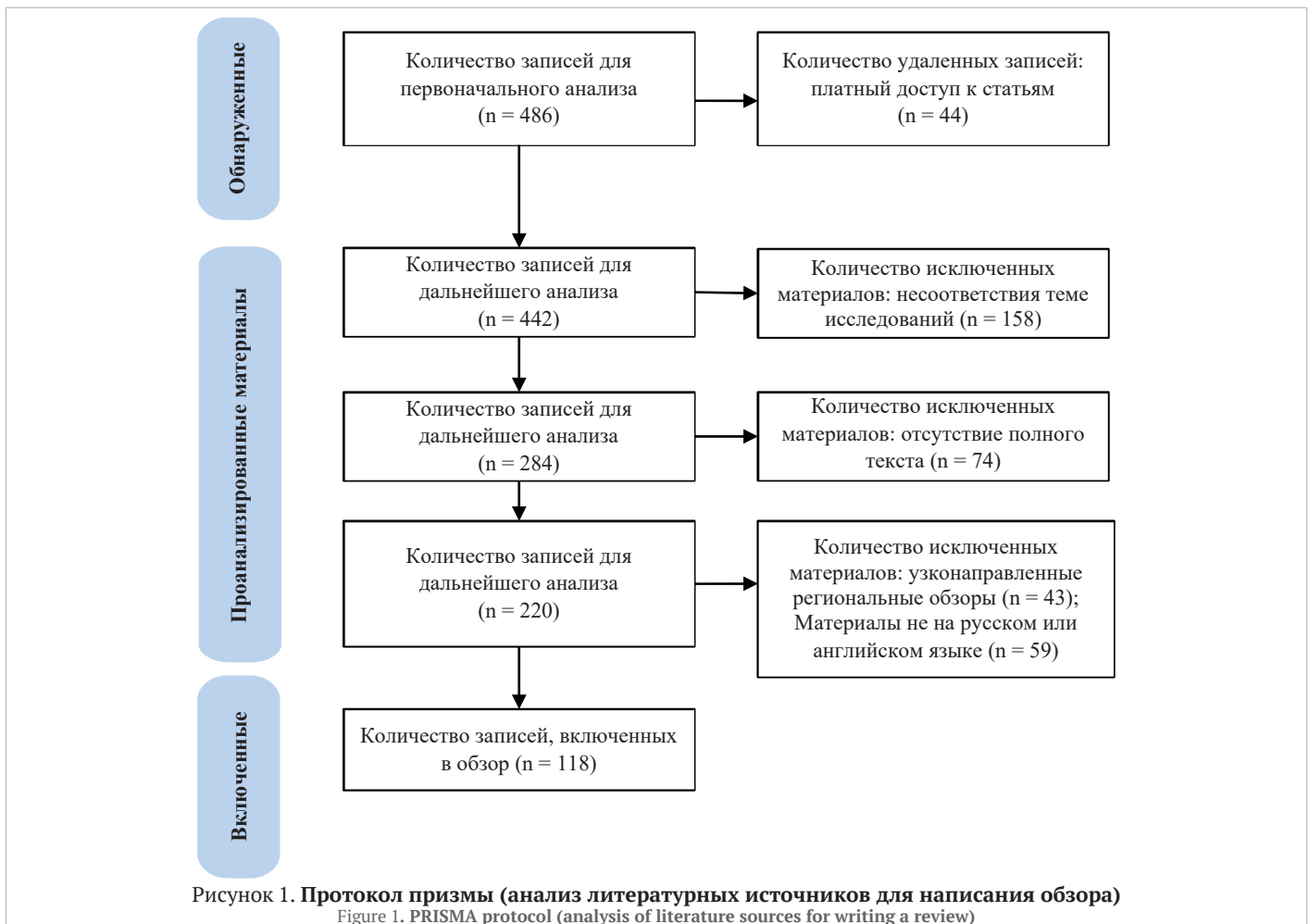
Настоящий обзор посвящен проблеме образования и идентификации микропластиков в различных природных объектах.

Целью настоящего обзора являлось проведение анализа источников появления микропластика в различных объектах окружающей среды, а также рассмотрение методов его обнаружения и идентификации.

2. Материалы и методы

Объектами изучения являлись научные публикации и патентные исследования российских и зарубежных авторов в области создания и разработки современных биоразлагаемых материалов на основе синтетических и природных компонентов. В базах PubMed, Scopus, Mendeley и в открытых интернет-источниках был проведен поиск исследований, опубликованных в период с 2000 по 2024 годы, с использованием нескольких комбинаций ключевых слов, включая следующие: полимерные материалы, микропластик, идентификация, биоразлагаемая упаковка. Результаты анализа литературы для подготовки обзора в виде схемы PRISMA представлены на Рисунке 1.

Статьи, написанные не на английском и русском языках, а также без полнотекстовой информации, были исключены. Из подобранных материалов также были исключены статьи, не относящиеся к теме настоящего обзора.



3. Микропластик: источники образования

Микропластиком принято считать частицы полимера размером менее 5 мм, которые остаются в окружающей среде в течение длительного времени. Вода является наиболее типичной средой для его транспортирования из одного места в другое, попадая в пищевую цепь, где он оказывает пагубное воздействие на флору и дику природы, представляя серьезную угрозу для здоровья человека [17].

В процессе разрушения у полимерного материала постепенно наблюдается потеря массы, межмолекулярные связи теряют свою силу под действием внешних факторов, что приводит к фрагментации материала. Разобщенные полимерные частицы, в свою очередь, подвергаются микробной деградации [18]. Каждый этап разложения пластмассового мусора занимает длительное время, особенно микробная деградация мелких фрагментов [19,20].

Частицы пластика делят на 3 группы по их размеру: микропластик (< 5 мм), мезопластик (5–20 мм) и макропластик (> 20 мм). Такие фрагменты легко оседают в почве, по сточным водам попадают в реки и моря и даже присутствуют в воздушной среде [21].

Первые научные исследования появились еще в 1970-х [22]. Мировое научное сообщество стало проявлять интерес к проблеме микропластика, увеличилось количество исследований, посвященных его распространению в окружающей среде. Стали подниматься вопросы о влиянии микропластици на природные процессы, на здоровье людей и животных. Сегодня доступно большое количество работ по исследованию степени загрязнения городов, рек и почв, а также большое количество отчетов и материалов с конференций, рассматривающих степень влияния микропластика на флору и фауну планеты [18,20,22,23].

Микроскопические полимерные частицы попадают в окружающую среду двумя путями: в виде фрагментов уже готовой полимерной продукции, а также в форме специально созданных микропластиков промышленного назначения. Большие города заполнены микропластиком из-за стирания автомобильных шин — например, в Нидерландах ежегодно в окружающую среду выбрасывается 17 000 тонн износа резиновых шин [24]. В Германии выбросы могут достигать 92 594 тонн в год. Расчетный глобальный средний показатель выбросов шин на душу населения составляет 0,81 кг в год [25]. Микропластик оседает в городской пыли, высвобождается из синтетических тканей, предметов домашнего обихода, строительных материалов, образуется при сжигании отходов и на свалках. Строительные материалы, 3D-печать и даже фильтрующее оборудование выделяют микропластик в окружающую среду [18,26]. Также сельскохозяйственная деятельность способствует проникновению полимерных частиц в почву через удобрения, орошение водой и др. [27]. Все вышеперечисленные источники загрязнения способствуют возникновению в природе вторичного микропластика [18,23,25,26].

Первичный микропластик изначально представляет собой гранулы полимеров, которые используются в различных производственных отраслях. Их применяют в качестве промышленных адгезивов и при производстве косметических средств [28]. Производители шампуней, гелей, лаков, дезодорантов, различных кремов и масок, зубных паст используют микропластик как добавку для придания необходимых свойств продукции. Добавление полимерных частиц позволяет регулировать вязкость продукта, создавать пенящийся эффект, повышать сроки годности. Микропластик используется в качестве абразивных частиц в некоторых скрабах, а также входит в состав ряда солнцезащитных фильтров и других продуктов [28,29].

Масштабы распространения пластикового мусора и его фрагмен-

тов внушают значительные опасения. Внимание научного сообщества и различных экологических организаций в большей степени направлено на изучение загрязнения мирового океана.

4. Микропластик в водной среде

Микроскопические полимерные фрагменты попадают в водную среду различными путями. Загрязнение прибрежных территорий, речные и атмосферные переносы частиц, морской промысел (краска с кораблей, фрагменты рыболовных снастей и др.) — все это источники микропластика в океанических водах [30]. За последние 10 лет было проведено большое количество исследований, направленных на изучение роли рек в распространении загрязнений в водных объектах. Самый масштабный выброс пластика (86% от мирового объема) осуществляется азиатскими реками, их ежегодный вклад составляет диапазон 1,00–2,06 млн тонн. Высокая плотность населения, большое количество полимерных отходов и сильные осадки обуславливают лидирующее положение Азии по объемам загрязнения Мирового океана. Самым крупнейшим водосборным бассейном является китайская река Янцзы. Речной поток транспортирует в Восточно-Китайское море от 0,31 до 0,48 млн тонн в год, обгоняя реку Ганг (0,10–0,17 млн тонн в год). Индонезия является одним из основных источников загрязнения на азиатском континенте. Со стоком рек Брантас, Прого, Сераю и Соло в океан попадает около 0,2 млн тонн микропластика, что составляет 14,2% от общемирового объема. На остальные регионы мира приходится еще 14% общемирового объема микропластика, попадающего в океан. Из них 7,8% приходится на Африку, 4,8% — на Южную Америку, 0,95% — на Центральную и Северную Америку, 0,28% — на Европу и 0,2% — на Австралийско-Тихоокеанский регион [31].

Таким образом, по оценкам ученых, речные системы вносят в Мировой океан от 0,8 до 2,7 млн тонн пластика в год [32]. Под воздействием ультрафиолета и морской среды пластик начинает разрушаться, фрагментируясь на микропластики, что приводит к увеличению концентрации микропластика в воде. Исследование восточной части Тихого океана показало, что концентрация микропластика в международных водах значительно выше, чем в юго-восточных и северо-западных районах. Анализ проб воды выявил наивысшее содержание частиц размером 150–500 мкм (71% от общего количества обнаруженных частиц) [33].

На Рисунке 2 визуальнo представлен микропластик, обнаруженный в Баренцевом море в 2019 году.

Такое количество микроскопических частиц пластиков не может не влиять на нормальное функционирование природных систем и процессов. Известно, что почти 700 морских видов и более 50 пресноводных видов проглотили макропластик или запутались в нем [35]. В организмах 220 различных видов морских обитателей от беспозвоночных до рыб был обнаружен микропластик, так как животные заглатывают частицы по случайности либо путая их с пищей. Из всех выявленных видов 55% относятся к промысловым, например: мидии, анчоусы, атлантическая треска, карп, коричневая креветка, норвежский омар, атлантическая сельдь, сардины и др. [28,32,35]. В 2018 году было проведено исследование на содержание микропластика в мидиях, продаваемых в английских супермаркетах. Полимерные фрагменты были обнаружены во всей продукции, причем в полуприготовленных мидиях их содержание значительно превышало количество частиц в свежем продукте [36]. Заглатывание микроскопических частиц чревато блокировкой пищевых путей, что, в свою очередь, вызывает истощение. Поглощение микропластика способ-

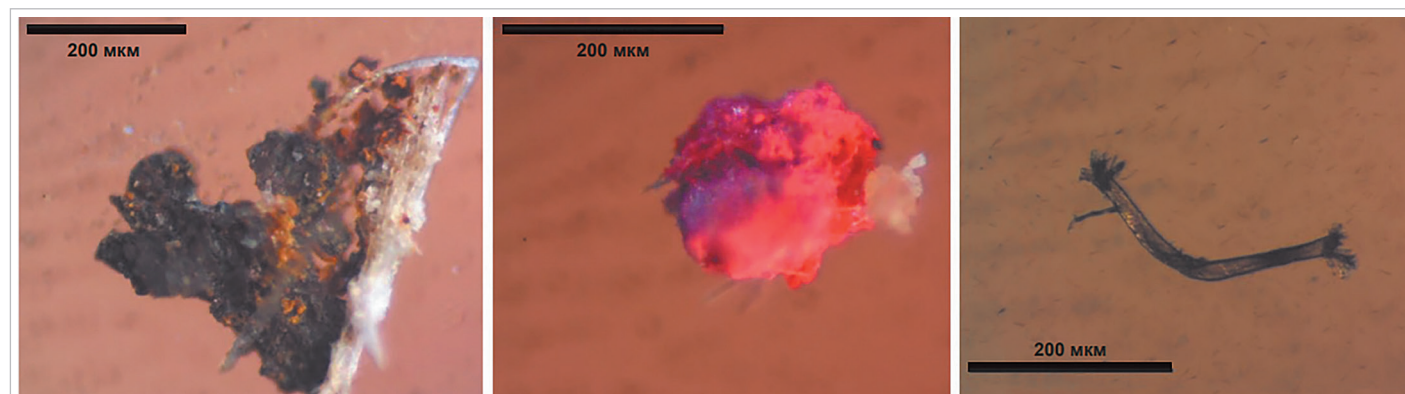


Рисунок 2. Полимерные фрагменты в пробах из Баренцева моря, 2019 г. [34]

Figure 2. Polymer fragments in the samples from Barents Sea, 2019 [34]

ствует нарушению работы пищеварительного тракта, дыхательных органов, снижению плодovitости и является фактором смертности [37]. Микропластик может негативно влиять на морские организмы как механически, так и токсически из-за переносимых загрязнителей [42,43,44]. Полимерные гранулы обладают высокой сорбционной способностью [41], что приводит к поглощению различных веществ из морской среды, включая полихлорированные бифенилы (ПХБ) [42]. Накопление этих веществ в организме человека может вредить органам (печени, почкам, коже, нервной системе), накапливаясь в жировых тканях, иметь канцерогенное влияние и значительно подавлять иммунитет [43]. Некоторые загрязнители изначально находятся в полимерной матрице. Красящие вещества, матирующие агенты, бисфенол А (для создания поликарбонатов и эпоксидных смол), антимикробные агенты, УФ-стабилизаторы и другие добавки, используемые в промышленности для придания материалу необходимых качеств, остаются связанными с полимерными гранулами даже в процессе биоразложения [44]. Таким образом, загрязнитель остается в структуре полимера, переносится вместе с частицами на значительные расстояния, попадая во все экосистемы и оказывая токсическое воздействие на биоту и природные среды.

Даже теоретические количественные оценки концентраций микропластика в окружающей среде вызывают необходимость исследования всех потенциальных зон его распространения. По данным исследований, на суше содержание частиц пластика может быть в 4–23 раза больше, чем в океане [45]. Согласно оценкам 2016 года, жители Европы произвели объем микропластика, соответствующий 43–63 тыс. тонн в год, поступившего через ил в сельскохозяйственные агрокомплексы [46]. Жизнедеятельность человека способствует вариативности распространения микропластика. Неправильное обращение с отходами в городах, свалки, очистительные сооружения, осаждение частиц пластика из воздуха — все это непосредственные причины загрязнения. Примерно 32% пластиковых отходов изначально попадают в почву или континентальные водные экосистемы [11]. Исследование, рассматривающее производство, использование и управление отходами пластиковых материалов, показало, что было произведено приблизительно 6300 млн тонн пластиковых отходов, из которых порядка 4977 млн тонн скопилось на свалках и в природной среде [47].

5. Микропластик в почве

При попадании в почву фрагменты полимерного загрязнителя подвергаются физико-химическому воздействию почвенного слоя и всех его живых организмов [48]. Большинство используемых полимерных соединений и добавок к ним обладают эстрогенной активностью и могут вызывать эндокринные нарушения у позвоночных и некоторых беспозвоночных [49]. Распад микропластика на еще более мелкие частицы увеличивает отношение поверхности к объему в геометрической прогрессии. Такой процесс окажет значительное воздействие на здоровье биотических элементов почвенной среды. Микроскопические частицы пластика также взаимодействуют с биологическими мембранами, органеллами и молекулами, что вызывает эффекты воздействия токсичного химического вещества: повреждение клеток из-за окислительных процессов, воспаления и т. д. [54,55,56,57]. Исследования показывают, что микрофрагменты полимерного мусора влияют на биоразнообразие почвенных микроорганизмов [48], способны проникать в кровь, а также плаценту человека [43] и вызывают поведенческие изменения при попадании в мозг у рыб [54].

Количественная оценка переноса частиц по трофической цепи в почвенной среде показала, что их концентрация в почве (~0,9 частиц/г) значительно ниже, чем в дождевых червях (~14 частиц/г) или куриных фекалиях (~129 частиц/г) [55]. Это свидетельствует об активном поглощении микропластика организмами и о его свободном перемещении по пищевой цепи. Аккумуляция частиц затрагивает все виды планеты, включая как человека, так и организмы, поглощающие пищу нетривиальными способами, например, микропластик размером менее 0,5 мкм накапливается в дрожжах и нитчатых грибах [53,56]. Поскольку точных количественных исследований недостаточно, сложно предположить степень негативного влияния микропластика на здоровье и разнообразие живого и неживого мира планеты.

6. Микропластик в воздухе

Помимо оседания в почвенном слое, микропластик может перемещаться на значительные расстояния по воздуху [57]. За последние годы были проведены различные исследования, направленные на выявление микропластика в воздушном пространстве различных

городов. Анализ синтетических волокон в атмосфере Парижа и прилегающих к нему городов показал, что из атмосферы осажается от 29 до 280 частиц на квадратный метр в день [58]. Китайские ученые сообщили, что в городе Дунгуань скорость осаждения частиц в день варьируется от 175 до 313 частиц на квадратный метр [59]. Также было проведено исследование потенциальных источников и пространственного распределения атмосферных частиц в Шанхае. Объем синтетических фрагментов в пробах воздуха составлял 54% [60]. При анализе атмосферы Лондона было выявлено 15 различных видов полимеров, скорость осаждения которых составляет от 575 до 1008 частиц на квадратный метр в день [61]. В иранском городе Асалуе анализ уличной пыли из 15 разных мест выявил наличие частиц от 2 мкм до 100 мкм с концентрацией 1 частица на квадратный сантиметр [62]. Оценка дорожной пыли центрального района Тегерана (Иран) выявила от 88 до 605 частиц микропластика в каждом 30 г. Размер частиц варьируется от 250 мкм до 500 мкм [63].

Важным аспектом исследования загрязнения атмосферы полимерными частицами является анализ воздуха в помещении, так как в современных реалиях люди большую часть времени находятся в зданиях: работа, дом и др. В британском исследовании 2018 года сообщается, что частицы, находящиеся в комнатных помещениях, оказывают большее воздействие на человека. Сравнивая количество микропластика, попадающего в человеческий организм из мидий и клетчатки, содержащей полимерные частицы из воздушной среды, авторы исследования пришли к заключению, что осаждение частиц из пыли в домашних условиях составляет 13 731–68 415 частиц в год на душу населения. [32,36,37,39]. Оценка воздействия микропластика на человека в помещении проводилась датскими учеными с помощью манекена, имитирующего дыхание человека. Полимерные частицы, 81% которых составлял полиэтилен, были обнаружены в каждом образце. Концентрация микропластика составила от 1,7 до 16,2 частиц на кубический метр [64]. Французские исследователи провели похожий эксперимент. В пробах из воздушного пространства частных квартир Парижа обнаружили концентрации полимерных частиц от 3 до 15 частиц на квадратный сантиметр [65]. Исследование пыли, собранной обычным пылесосом, также показало высокую концентрацию микропластика — от 190 до 670 волокон на миллиграмм [66]. Наличие микропластика в воздушной среде, как и во всех других средах, объясняется исключительно антропогенными факторами, однако содержание волокон в исследованиях городского воздуха и пыли значительно выше. Урбанистические районы страдают обилием синтетических тканей и предметов домашнего обихода, выделяющими волокнистые частицы микропластика. Однако исследования показывают, что перенос частиц в природе достигает повсеместного масштаба [57,58,61,65,66]. Исследование отдаленного горного водосборного бассейна во Франции показало наличие осажденных из воздуха частиц. Анализ проводился путем исследования сухого и влажного атмосферного осаждения. В течение пяти месяцев эксперимента в испытываемых образцах были выявлены волокна длиной до 750 мкм и частицы не более 300 мкм. По относительным суточным подсчетам в водосборном бассейне осажается 249 гранулированных фрагментов и 44 волокна на один квадратный сантиметр [67].

7. Микропластик в питьевой воде

Высокие концентрации в помещениях могут быть объяснены наличием нескольких источников микропластика (предметы домашнего обихода и одежда из синтетических тканей) и различными механизмами, участвующими в их рассеивании, такими как скорость вентиляции, воздушный поток и климатические условия [57,68].

Загрязнение окружающей среды микропластиком представляет угрозу не только для экологии, но и для здоровья людей. На сегодняшний день с уверенностью можно сказать, что полимерные фрагменты поступают в организм человека несколькими путями: через дыхание, употребление зараженной продукции, питьевую воду и даже через непосредственный контакт пластиков с кожей. Наибольшее количество наночастиц пластика поступает в организм через продукты питания и воду [32,36,45,52,69].

Американскими учеными Ш. А. Мейсон, В. Г. Уэлч и Дж. Нератко протестировано 259 образцов бутилированной воды [70]. Образцы принадлежали одиннадцати разным брендам из девятнадцати разных мет в девяти странах. В 93% проб обнаружены признаки загрязнения микропластиком. Средняя концентрация микропластика в обработанной воде составила 10,4 частиц размером более 100 мкм на литр. Исследования морфологии загрязнения и ее природы показали 66% частиц и 34% волокон, половина которых являлась полимерами, 54% — полипропилен. Для исследования частиц менее

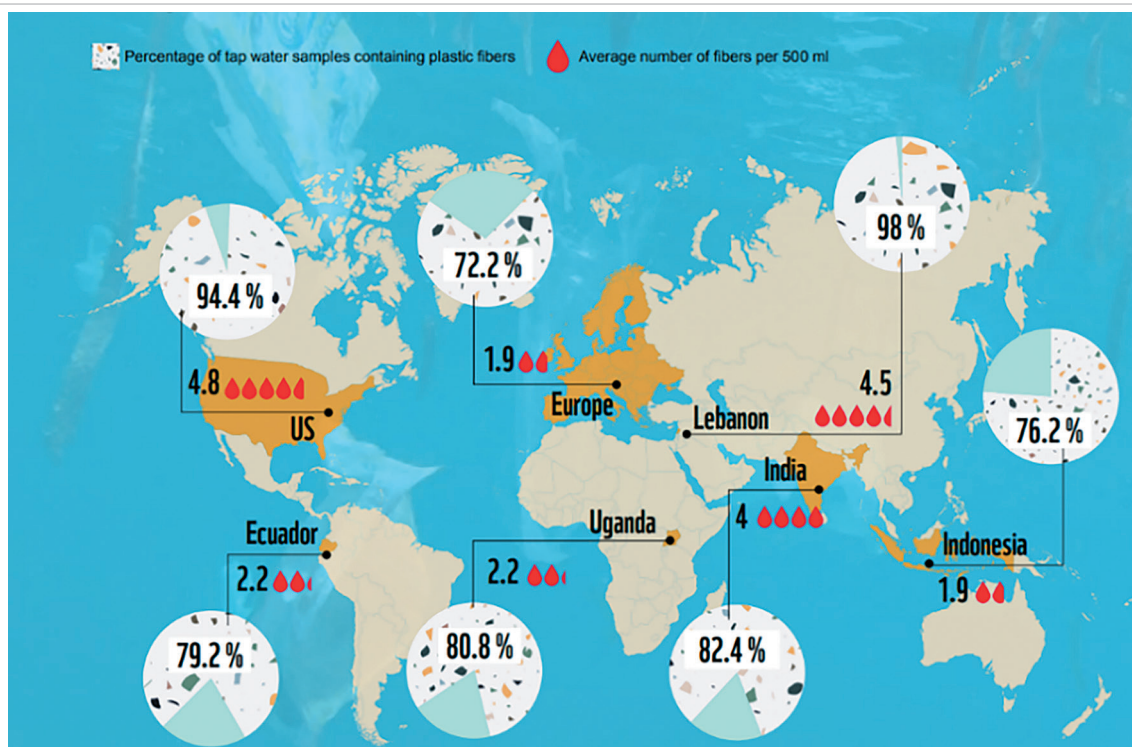


Рисунок 3. Процентное содержание образцов в водопроводной воде по всему миру (круги) с учетом среднего количества волокон на 500 мл (красные капли) [72]

Figure 3. Percentage of samples in tap water worldwide (circles) with account for the average quantity of fibers per 500 ml (red drops) [72]

100 мкм ученые использовали краситель Нильский красный. Адсорбция наночастицами красителя дает возможность предположить их принадлежность к пластикам. Если учитывать все обнаруженные частицы (6,5–100 мкм), ученые заявляют, что в среднем концентрация загрязнения составляет 325 частиц микропластика на литр при диапазоне от 0 до более 10000 частиц на литр. Вероятнее всего, источником попадания микропластика в бутилированную воду является упаковка [70]. Анализ подземных вод Германии показал, что пробы, взятые на разных этапах поставок воды, демонстрируют наличие микропластика от 0 до 7 частиц в кубическом сантиметре [71]. Крайние значения соответствуют необработанной воде из источника и питьевой воде соответственно. Средняя концентрация микропластика составила 0,7 частиц на кубический сантиметр. Исследование показало наличие таких полимеров, как полиэтилен, полиамид, полиэстер, эпоксидная смола и поливинилхлорид. Размер частиц варьировался от 50 до 150 мкм. Вероятными источниками микропластика в пробах данного исследования является истирание пластикового оборудования, используемого для очистки воды, или его транспортировка из других источников [71].

На Рисунке 3 проиллюстрированы средние концентрации микропластика в водопроводной воде по всему миру. Аналитические данные всемирного фонда дикой природы демонстрируют, что в Ливане содержание микропластика в пробах водопроводной воды составляет около 98% с концентрацией в среднем 4,5 волокна на 500 мл. Ниже всего показатель на Европейском континенте — 72%, где на 500 мл приходится около 1,9 волокна.

8. Микропластик в организме человека

Полимерные фрагменты накапливаются и распространяются по трофическому пути, в итоге попадая в организм человека [73]. Однако микропластик находится не только в живых организмах, потребляемых в пищу [68,77,78,79]. Сахар, соль, мед и пиво, по данным исследований, также содержат полимерные фрагменты [80,81,82]. Дать количественную оценку загрязнения микропластиком пищевых продуктов невозможно, так как масштаб исследований еще недостаточно большой, но, учитывая данные исследований о содержании полимерных фрагментов в воде, почве и воздухе, можно предположить, что практически каждый продукт содержит в себе микропластик.

Через кожный покров в организм человека поступает небольшое количество микропластика, так как полимерные частицы обладают гидрофобностью. Однако проникновение возможно через волосяные фолликулы, выходы потовых желез и травмированные участки

кожи [80]. В 2004 году было проведено исследование фолликулярных отверстий свиньи после нанесения на кожу животного флуоресцентных частиц полистирола размером 20 и 200 нм. Результаты анализа показали, что проникновение частиц происходит, однако дальнейшего движения в глубокие ткани кожи не наблюдалось [81]. Аналогичное исследование подтвердило проникновение частиц полистирола диаметром 20–200 нм в поверхностные слои кожи примерно на 2–3 мкм [82]. Миграция полимерных фрагментов наиболее вероятна из косметических средств, в которых содержатся гранулы в качестве функциональных добавок. При тестировании скрабов для лица, в состав которых входят полиэтиленовые шарики диаметром около 0,2 мм, были обнаружены наночастицы в размерном диапазоне от 18 нм до 68 нм. Спектроскопический анализ доказал, что состав частиц соответствовал полиэтилену [83].

Проникновение полимерных частиц в организм из разных источников имеет отличие в большей степени в путях распространения. Наличие полимерных фрагментов в системе функционирования человека может иметь как нейтральные, так и негативные последствия. При вдыхании пластиковых фрагментов есть вероятность их попадания на альвеолярную поверхность легких. Тканевый барьер этой поверхности имеет толщину менее 1 мкм [84] и не затрудняет проход наночастиц в кровеносную систему, которая разносит их по всему телу [85,86]. Исследование альвеолярных эпителиальных клеток показало, что нанопластиковые частицы поглощаются ими, причем скорость поглощения зависит от размера фрагментов. Исследования [87,88] показали, что наночастицы полистирола могут вступать в воспалительные реакции и влиять на функционирование эпителиальных клеток и физиологических процессов. Проглатывание микропластика чревато его скоплением в пищеварительном тракте, что приводит к появлению пластикового безоара (инородное образование в пищеварительном тракте) [89]. Информация из различных источников демонстрирует накопление микропластика в пищеварительном тракте рыб, вероятно, из-за плохого всасывания микропластика через пищеварительный тракт в ткани [93,94,95]. Также учеными было предположено, что острое пероральное воздействие положительно заряженных наночастиц полистирола может нарушить транспорт железа в кишечнике и его поглощение клетками [93].

По данным отчета Всемирной организации здравоохранения [94], проведенные исследования абсорбции показывают, что микропластики > 150 мкм, скорее всего, выводятся из организма. Ожидается, что поглощение более мелких частиц будет ограниченным, хотя поглощение и распределение очень мелких микропластичных частиц,

включая наночастицы, могут быть выше. Токсикологические исследования на крысах и мышах показали некоторые последствия, включая воспаление печени. Однако в плане надежности и актуальности эти исследования вызывают сомнения, поскольку они сообщают о результатах при очень высоких концентрациях, которые не характерны для питьевой воды. Для оценки рисков для здоровья, связанных с химическими веществами в микропластике, был проведен анализ пределов воздействия (отношение уровня отсутствия наблюдаемых побочных эффектов к теоретической, прогнозируемой или предполагаемой дозе или концентрации, поступающей в организм человека [95]). Он проводился для химических веществ, обнаруженных в микропластике, представляющих токсикологическую опасность и имеющих адекватные или приемлемые токсикологические характеристики.

Однако сегодня можно с уверенностью сказать, что в каждом человеке присутствует хотя бы одна частица микропластика [96]. Проанализированные образцы демонстрируют наличие пластика как со стороны плода, на материнской стороне и на хориоамниотических мембранах (внешние мембраны плода). Размер выявленных частиц составил около 10 мкм, что соответствует размерам частиц, переносимых кровотоком.

9. Методы обнаружения и идентификации микропластика

Исследования загрязнения окружающего мира поставили вопрос о детальном анализе микропластика, сфер его распространения и влияния на живые организмы. Обнаружение наночастиц является непростой задачей из-за их малого размера и принадлежности химической природы к органическим веществам [97].

Сегодня используется пять методов: окрашивание частиц (как правило, Нильским красным) с последующим анализом флуоресцентной микроскопией; растровая электронная микроскопия с рентгеновским энергодисперсионным спектральным анализом (РЭМ-ЭДА); инфракрасная спектроскопия (ИК-спектроскопия) с преобразованием Фурье (FT-IR); рамановская спектроскопия (спектроскопия комбинационного рассеяния, КР-спектроскопия); пиролиз с последующей газовой хроматографией и масс-спектрометрией (ГХ/МС) [98–104].

Метод окрашивания не позволяет получить количественные данные о типах полимеров. Также отсутствует определение химического состава частиц, однако метод является самым быстрым, простым и дешевым способом анализа. Он дает возможность получить морфологическую информацию и определить количество частиц. При этом данный способ анализа может дать ложноположительные результаты. РЭМ-ЭДА позволяет проводить анализ вплоть до нанометровых частиц и разделять органические и неорганические материалы, а также проводить элементный анализ. Недостатками этого метода являются дополнительная пробоподготовка, отсутствие определения химического состава и высокая стоимость.

Инфракрасная и рамановская спектроскопии дают более детальную картину. Использование ИК- дает морфологическую информацию, возможность определения состава и выявления количества частиц, типов полимеров. Надежность и простота использования в сочетании с разумной стоимостью делает FT-IR-спектроскопию достаточно распространенным методом определения пластика. Неразрушающий анализ успешно применяется для обнаружения микропластика в пробах воды и отложениях [105,106,107,108]. Определяемое химическое вещество поглощает инфракрасный свет, что

дает набор диапазонов, так называемый спектр или «молекулярный отпечаток». По таким характеристикам, как поглощение и его интенсивность, определяют группы атомов и их концентрации [106]. Сочетание FT-IR-спектроскопии и микроскопии отлично подходит для определения частиц непосредственно на мембране фильтра и не требует длительной пробоподготовки [107]. Анализ микро-FT-IR-спектроскопии может быть выполнен как в режиме передачи (дает высококачественные спектры) [108,109], так и в режиме отражения (быстрый анализ толстых и непрозрачных образцов) [109]. Возможности, предоставляемые режимами, прекрасно подходят для выявления микропластика в образцах окружающей среды. Несмотря на значительные преимущества, методика не приспособлена для исследования крупных частиц в просвечивающем режиме, а фрагменты менее 10 мкм и вовсе не подвергаются анализу. На Рисунке 4 изображены результаты анализа микропластика методом FTIR-спектроскопии.

Спектроскопия комбинационного рассеяния представляет собой бесконтактный, неразрушающий метод анализа. Его использование дает возможность получения морфологической информации, химического состава. Рамановская спектроскопия, в отличие от ИК, способна анализировать частицы размером до 1 мкм и менее и дает информацию о внутримолекулярных и межмолекулярных колебаниях. Также метод предполагает определение количества частиц и типов полимеров. Единственным недостатком является сложность с флуоресцирующими материалами. Рисунок 5, представленный ниже, демонстрирует спектр полипропиленовой микрочастицы, определяемой рамановской спектроскопией.

При использовании пиролиза с ГХ/МС возможен количественный анализ (масс частиц) и частичное определение химического состава, однако такой метод является разрушающим и не дает морфологической информации. Образец вводится в нагретую среду и разбивается на более мелкие стабильные фрагменты, известные как пиролизаты, для анализа. Затем пиролизаты разделяют хроматографически. Как только пиролизаты разделены, данные анализируются. Когда образец вводится в установку пиролиза, он мгновенно нагревается от температуры окружающей среды до желаемой температуры в инертной атмосфере. При использовании данного инструмента образец разрушается под воздействием высоких температур, и провести повторное измерение представляется невозможным.

Для достоверной идентификации микропластика и подтверждения химического состава его материала необходимо комбинировать представленные выше методы [6]. Новые подходы могут включать внедрение спектроскопии поглощения нано-FTIR и спектроскопии комбинационного рассеяния, а также комбинированной атомно-силовой микроскопии и инфракрасной спектроскопии (AFM-IR), которые демонстрируют возможность в области определения химических характеристик на наномасштабе [7,112,113]. Комбинированный подход, использующий оптические и множественные методы химической характеристики, может устранить некоторые из методологических ограничений [114,115]. Применяются передовые методы картирования FTIR для разработки автоматизированных методов [116]. Такие методы будут иметь решающее значение для новых исследований микропластика (< 100 нм), которые все больше распространяются в окружающей среде, поскольку их использование увеличивается в тенденциях производства и по мере того, как макро- и микропластиковые отходы продолжают разлагаться [117].

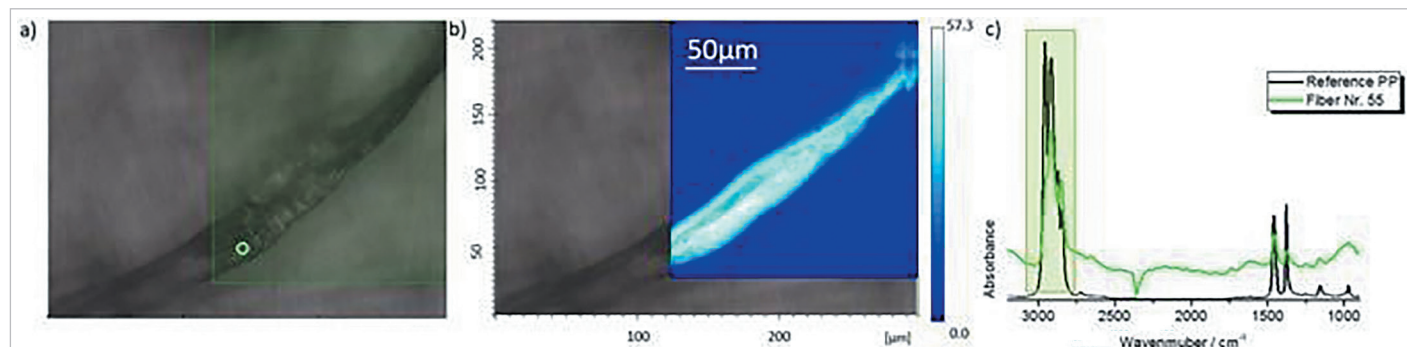


Рисунок 4. Оптическое изображение полипропиленового волокна (а), химическое изображение, полученное методом FTIR (б), и спектр волокна (зеленая линия) в соответствии со спектрами полипропилена (черная линия) [110]

Figure 4. Optical image of the polypropylene fiber (a), chemical image obtained by the FTIR method (b), and the fiber spectrum (green line) in correspondence with the polypropylene spectra (black line) [110]

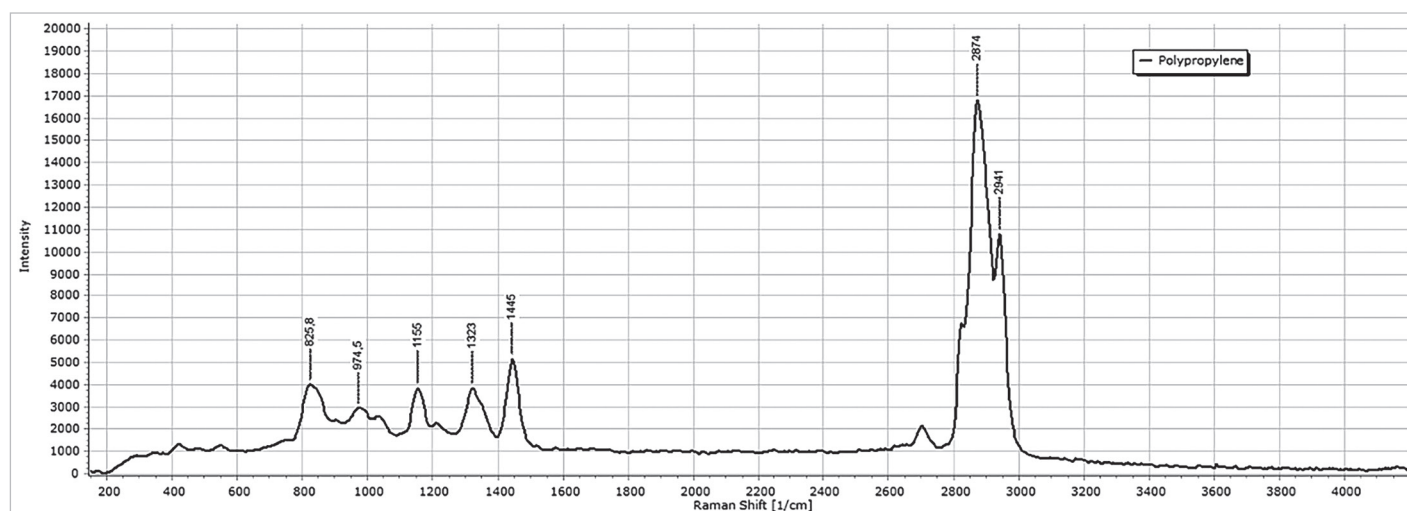


Рисунок 5. Рамановский спектр частицы полипропилена [111]

Figure 5. Raman spectrum of the polypropylene particle [111]

10. Выводы

Представленные в обзоре данные свидетельствуют о том, что микро- и нанопластики присутствуют в различных средах, в том числе в организме человека. На данный момент не существует глобального решения по защите воды, воздуха и почвы от их загрязнения.

Рассмотренные способы идентификации полимерных частиц различной природы хорошо себя показывают на однокомпонентных средах, в то время как в сложных системах, например, в продуктах питания, обнаружение микропластика затруднено.

Поэтому важно развивать методы обнаружения микропластиков не только с точки зрения расширения спектров идентифика-

ции полимерных материалов, но и уделять внимание подготовке проб из различных сред для анализа. Это позволит в будущем облегчить дальнейшие исследования по их выявлению и обеспечить возможность сравнения различных данных в глобальных исследованиях.

Формирование мер по уменьшению производства полимеров будут способствовать сдерживанию негативного влияния микропластиков на окружающую среду. Однако избавить природу от загрязняющих полимерных фрагментов до сих пор является проблемой, над решением которой работают ученые во всем мире.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCE

- Strategy, P. (2018). A European strategy for plastics in a circular economy. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Brussels 12. Retrieved from [http://gretere.migaik.ru/sites/default/files/materials/2_00_A%20European%20Strategy%20for%20Plastics%20in%20a%20Circular%20Economy%20\(Brussels,%202016.1.2018\).pdf](http://gretere.migaik.ru/sites/default/files/materials/2_00_A%20European%20Strategy%20for%20Plastics%20in%20a%20Circular%20Economy%20(Brussels,%202016.1.2018).pdf) Accessed February 25, 2024
- Henderson, L., Green, C. (2020). Making sense of microplastics? Public understandings of plastic pollution. *Marine Pollution Bulletin*, 152, Article 110908. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.110908>
- Hartley, B. L., Pahl, S., Veiga, J., Vlachogianni, T., Vasconcelos, L., Maes, T. et al. (2018). Exploring public views on marine litter in Europe: Perceived causes, consequences and pathways to change. *Marine Pollution Bulletin*, 133, 945–955. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.05.061>
- Fraunhofer-Gesellschaft (2018). Impact through research: Applied research for Europe's future. Retrieved from <https://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2018/november/the-rto-summit.html> Accessed May 11, 2023.
- European Bioplastics EV (2018). European bioplastic. The Plastics Strategy – the contribution of bioplastics to a sustainable plastics circular economy. Berlin, Germany. Retrieved from <https://www.european-bioplastics.org/plastics-strategy-contribution-of-bioplastics-to-a-sustainable-circular-plastics-economy/> Accessed February 25, 2024
- Steenstaad, I. M., Syberg, K., Rist, S., Hartmann, N. B., Boldrin, A., Hansen, S. F. (2017). From macro- to microplastics: Analysis of EU regulation along the life cycle of plastic bags. *Environmental Pollution*, 224, 289–299. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.02.007>
- European Commission (2019). Press Report. Plastic Waste: A European Strategy to Protect the Planet, Defend Our Citizens and Empower Our Industries: Strasbourg. Retrieved from <https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/10/2019-Plastics-the-facts.pdf> Accessed February 25, 2024
- Correia, M., Loeschner, K. (2018). Detection of nanoplastics in food by asymmetric flow field-flow fractionation coupled to multi-angle light scattering: Possibilities, challenges and analytical limitations. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 410(22), 5603–5615. <https://doi.org/10.1007/s00216-018-0919-8>
- Vighi, M., Bayo, J., Fernández-Piñas, F., Gago, J., Gómez, M., Hernández-Borges, J. et al. (2021). Micro and nano-plastics in the environment: Research priorities for the near future. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 257, 163–218. <https://doi.org/10.1007/978-2021-69>
- Anderson, A. G., Grose, J., Pahl, S., Thompson, R. C., Wyles, K. J. (2016). Microplastics in personal care products: Exploring perceptions of environmentalists, beauticians and students. *Marine Pollution Bulletin*, 113(1–2), 454–460. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.10.048>
- Proshad, R., Kormoker, T., Islam, S., Haque, M. A., Rahman, M., Mithu, M. R. (2018). Toxic effects of plastic on human health and environment: A consequences of health risk assessment in Bangladesh. *International Journal of Health*, 6(1), 1–5. <https://doi.org/10.14419/ijh.v6i1.8655>
- Wong, J. K. H., Lee, K. K., Tang, K. H. D., Yap, P. -S. (2020). Microplastics in the freshwater and terrestrial environments: Prevalence, fates, impacts and sustainable solutions. *Science of the Total Environment*, 719, Article 137512. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137512>
- Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A. et al. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768–771. <https://doi.org/10.1126/science.1260352>
- Shen, M., Song, B., Zeng, G., Zhang, Y., Huang, W., Wen, X. et al. (2020). Are biodegradable plastics a promising solution to solve the global plastic pollution? *Environmental Pollution*, 263, Article 114469. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114469>
- Prata, J. C., da Costa, J. P., Lopes, L., Duarte, A. C., Rocha-Santos, T. (2020). Environmental exposure to microplastics: An overview on possible human health effects. *Science of the Total Environment*, 702, Article 134455. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134455>
- Luo, T., Zhang, Y., Wang, C., Wang, X., Zhou, J., Shen, M. et al. (2019). Maternal exposure to different sizes of polystyrene microplastics during gestation causes metabolic disorders in their offspring. *Environmental Pollution*, 255, Article 113122. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113122>
- Rani, L., Kaur, G., Sood, P., Kaushal, J., Srivastav, A. L. (2024). Remediation strategies for the removal of microplastics from the water. Chapter in a book: Role of Green Chemistry in Ecosystem Restoration to Achieve Environmental Sustainability. Elsevier, 2024. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15291-7.00004-3>
- Andrady, A. L. (2011). Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 62(8), 1596–1605. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030>
- Zarfl, C., Matthies, M. (2010). Are marine plastic particles transport vectors for organic pollutants to the Arctic? *Marine Pollution Bulletin*, 60(10), 1810–1814. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.05.026>
- Europe, P. (2016). Plastics—the facts 2016: An analysis of European plastics production, demand and waste data. Association of Plastics Manufacturers. Retrieved from <https://pdfcoffee.com/plastics-a-the-facts-2016-plastics-europe-pdf-free-647a6db69802e.html> Accessed July 25, 2024
- Lehner, R., Weder, C., Petri-Fink, A., Rothen-Rutishauser, B. (2019). Emergence of nanoplastic in the environment and possible impact on human health. *Environmental Science and Technology*, 53(4), 1748–1765. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05512>
- Picó, Y., Barceló, D. (2019). Analysis and prevention of microplastics pollution in water: Current perspectives and future directions. *ACS Omega*, 4(4), 6709–6719. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b00222>
- Carpenter, E. J., Smith Jr, K. L. (1972). Plastics on the Sargasso Sea surface. *Science*, 175(4027), 1240–1241. <https://doi.org/10.1126/science.175.4027.1240>
- Verschoor, A., De Poorter, L., Roex, E., Bellert, B. (2014). Quick scan and prioritization of microplastic sources and emissions. National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), Advisory Letter 250012001.
- Kole, P. J., Löhr, A. J., Van Belleghem, F. G., Ragas, A. M. (2017). Wear and tear of tyres: A stealthy source of microplastics in the environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(10), Article 1265. <https://doi.org/10.3390/ijerph14101265>

26. Amato-Lourenço, L. F., dos Santos Galvão, L., de Weger, L. A., Hiemstra, P. S., Vijver, M. G., Mauad, T. (2020). An emerging class of air pollutants: Potential effects of microplastics to respiratory human health? *Science of the Total Environment*, 749, Article 141676. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141676>
27. Rillig, M. C., Ingrassia, R., de Souza Machado, A. A. (2017). Microplastic incorporation into soil in agroecosystems. *Frontiers in Plant Science*, 8, Article 1805. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01805>
28. Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., Galloway, T. S. (2011). Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 62(12), 2588–2597. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025>
29. Yaroslavov, A. A., Arzhakov, M. S., Khokhlov, A. R. (2022). The life cycle of polymer materials: Problems and prospects. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 92(1), 18–24. <https://doi.org/10.1134/S1019331622010087>
30. GESAMP (2016). Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: Part two of a global assessment (IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection). Rep. Stud. GESAMP, 2016
31. Lebreton, L. C. M., van der Zwet, J., Damsteeg, J.-W., Slat, B., Andrady, A., Reisser, J. (2017). River plastic emissions to the world's oceans. *Nature Communications*, 8(1), Article 15611. <https://doi.org/10.1038/ncomms15611>
32. Meijer, L. J., van Emmerik, T., van der Ent, R., Schmidt, C., Lebreton, L. (2021). More than 1000 rivers account for 80% of global riverine plastic emissions into the ocean. *Science Advances*, 7(18), Article eaaz5803. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz5803>
33. Liu, Y., Yang, Z.-H., Song, P.-P., Xu, R., Wang, H. (2018). Facile synthesis of Bi₂MoO₆/ZnSnO₃ heterojunction with enhanced visible light photocatalytic degradation of methylene blue. *Applied Surface Science*, 430, 561–570. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.06.231>
34. Ершова, А. А., Еремина, Т. Р., Дунаев, А. Л., Makeeva, И. Н., Татаренко, Ю. А. (2021). Исследование загрязнения микропластиком морей российской Арктики и Дальнего Востока. *Арктика: экология и экономика*, 11(2), 164–177. [Ershova, A. A., Eremina, T. R., Dunaev, A. L., Makeeva, I. N., Tatarenko, Yu. A. (2021). Study of microplastic pollution of the seas of the Russian Arctic and Far East. *Arctic: Ecology and Economics*, 11(2), 164–177. (In Russian)] <https://doi.org/10.25283/2225-4594-2021-2-164-177>
35. Gall, S. C., Thompson, R. C. (2015). The impact of debris on marine life. *Marine Pollution Bulletin*, 92(1–2), 170–179. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.12.041>
36. Li, J., Green, C., Reynolds, A., Shi, H., Rotchell, J. M. (2018). Microplastics in mussels sampled from coastal waters and supermarkets in the United Kingdom. *Environmental Pollution*, 241, 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.05.03>
37. Bergmann, M., Gutow, L., Klages, M. (2015). Marine anthropogenic litter Springer International Publishing, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3>
38. Mato, Y., Isobe, T., Takada, H., Kanehiro, H., Ohtake, C., Kaminuma, T. (2001). Plastic resin pellets as a transport medium for toxic chemicals in the marine environment. *Environmental Science and Technology*, 35(2), 31–8324. <https://doi.org/10.1021/es0010498>
39. Rios, L. M., Moore, C., Jones, P. R. (2007). Persistent organic pollutants carried by synthetic polymers in the ocean environment. *Marine Pollution Bulletin*, 54(8), 1230–1237. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.03.022>
40. Zarfl, C., Matthies, M. (2010). Are marine plastic particles transport vectors for organic pollutants to the Arctic? *Marine Pollution Bulletin*, 60(10), 1810–1814. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.05.026>
41. Mato, Y., Isobe, T., Takada, H., Kanehiro, H., Ohtake, C., Kaminuma, T. (2001). Plastic resin pellets as a transport medium for toxic chemicals in the marine environment. *Environmental Science and Technology*, 35(2), 318–324. <https://doi.org/10.1021/es0010498>
42. Ryan, P. G., Connell, A. D., Gardner, B. D. (1988). Plastic ingestion and PCBs in seabirds: Is there a relationship? *Marine Pollution Bulletin*, 19(4), 174–176. [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(88\)90674-1](https://doi.org/10.1016/0025-326X(88)90674-1)
43. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark, (2000). Chapter 5.10 Polychlorinated biphenyls (PCBs) Air Quality Guidelines — Second Edition. Retrieved from <https://pdf4pro.com/view/chapter-5-10-polychlorinated-biphenyls-pcbs-37a6a0.html> Accessed July 18, 2024
44. Thompson, R. C., Moore, C. J., vom Saal, F. S., Swan, S. H. (2009). Plastics, the environment and human health: Current consensus and future trends. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2153–2166. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0053>
45. Horton, A. A., Walton, A., Spurgeon, D. J., Lahive, E., Svendsen, C. (2017). Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities. *Science of the Total Environment*, 586, 127–141. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.190>
46. Nizzetto, L., Futter, M., Langaas, S. (2016). Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin? *Environmental Science and Technology*, 50(20), 10777–10779. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04140>
47. Geyer, R., Jambeck, J. R., Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), Article e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
48. de Souza Machado, A. A., Kloas, W., Zarfl, C., Hempel, S., Rillig, M. C. (2018). Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Global Change Biology*, 24(4), 1405–1416. <https://doi.org/10.1111/gcb.14020>
49. Sohoni, P., Sumpter, J. P. (1998). Several environmental oestrogens are also anti-androgens. *Journal of Endocrinology*, 158(3), 327–340. <https://doi.org/10.1677/joe.0.1580327>
50. Forte, M., Iachetta, G., Tussellino, M., Carotenuto, R., Prisco, M., De Falco, M. et al. (2016). Polystyrene nanoparticles internalization in human gastric adenocarcinoma cells. *Toxicology in Vitro*, 31, 126–136. <https://doi.org/10.1016/j.tiv.2015.11.006>
51. Hamoir, J., Nemmar, A., Halloy, D., Wirth, D., Vincke, G., Vanderplasschen, A. et al. (2003). Effect of polystyrene particles on lung microvascular permeability in isolated perfused rabbit lungs: Role of size and surface properties. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 190(3), 278–285. [https://doi.org/10.1016/S0041-008X\(03\)00192-3](https://doi.org/10.1016/S0041-008X(03)00192-3)
52. Jeong, C.-B., Won, E.-J., Hwang, H.-M., Lee, M.-C., Hwang, D.-S., Hwang, U.-K. et al. (2016). Microplastic size-dependent toxicity, oxidative stress induction, and p-JNK and p-p38 activation in the monogonont rotifer (*Brachionus koreanus*). *Environmental Science and Technology*, 50(16), 8849–8857. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b01441>
53. Oberdörster, G. (2000). Toxicology of ultrafine particles: In vivo studies. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 358(1775), 2719–2740. <https://doi.org/10.1098/rsta.2000.0680>
54. Mattsson, K., Johnson, E. V., Malmendal, A., Linse, S., Hansson, L. A., Cederwall, T. (2017). Brain damage and behavioural disorders in fish induced by plastic nanoparticles delivered through the food chain. *Scientific Reports*, 7(1), Article 11452. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-10813-0>
55. Huerta Lwanga, E., Gertsens, H., Gooren, H., Peters, P., Salánki, T., van der Ploeg, M. et al. (2016). Microplastics in the terrestrial ecosystem: Implications for *Lumbricus terrestris* (Oligochaeta, Lumbricidae). *Environmental Science and Technology*, 50(5), 2685–2691. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05478>
56. Schmid, O., Stoeger, T. (2016). Surface area is the biologically most effective dose metric for acute nanoparticle toxicity in the lung. *Journal of Aerosol Science*, 99, 133–143. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2015.12.006>
57. Dris, R., Gasperi, J., Saad, M., Mirande, C., Tassin, B. (2016). Synthetic fibers in atmospheric fallout: A source of microplastics in the environment? *Marine Pollution Bulletin*, 104(1–2), 290–293. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.01.006>
58. Dris, R., Gasperi, J., Rocher, V., Saad, M., Renault, N., Tassin, B. (2015). Microplastic contamination in an urban area: A case study in Greater Paris. *Environmental Chemistry*, 12(5), 592–599. <https://doi.org/10.1071/EN14167>
59. Cai, L., Wang, J., Peng, J., Tan, Z., Zhan, Z., Tan, X. et al. (2017). Characteristic of microplastics in the atmospheric fallout from Dongguan city, China: Preliminary research and first evidence. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(32), 24928–24935. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0116-x>
60. Liu, K., Wang, X., Fang, T., Xu, P., Zhu, L., Li, D. (2019). Source and potential risk assessment of suspended atmospheric microplastics in Shanghai. *Science of the Total Environment*, 675, 462–471. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.110>
61. Wright, S. L., Ulke, J., Font, A., Chan, K. L. A., Kelly, F. J. (2020). Atmospheric microplastic deposition in an urban environment and an evaluation of transport. *Environment International*, 136, Article 105411. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105411>
62. Abbasi, S., Keshavarzi, B., Moore, F., Turner, A., Kelly, F. J., Dominguez, A. O. et al. (2019). Distribution and potential health impacts of microplastics and micro-rubbers in air and street dusts from Asaluyeh County, Iran. *Environmental Pollution*, 244, 153–164. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.039>
63. Dehghani, S., Moore, F., Akhbarizadeh, R. (2017). Microplastic pollution in deposited urban dust, Tehran metropolis, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(25), 20360–20371. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9674-1>
64. Vianello, A., Jensen, R. L., Liu, L., Vollertsen, J. (2019). Simulating human exposure to indoor airborne microplastics using a Breathing Thermal Manikin. *Scientific Reports*, 9(1), Article 8670. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45054-w>
65. Gasperi, J., Dris, R., Mirande-Bret, C., Mandin, C., Langlois, V., Tassin, B. (20–24 September, 2015). First overview of microplastics in indoor and outdoor air. 15th EuChemS International Conference on Chemistry and the Environment. Leipzig, Germany, 2015.
66. Dris, R., Gasperi, J., Mirande, C., Mandin, C., Guerrouache, M., Langlois, V. et al. (2017). A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. *Environmental Pollution*, 221, 453–458. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.013>
67. Sridharan, S., Kumar, M., Singh, L., Bolan, N. S., Saha, M. (2021). Microplastics as an emerging source of particulate air pollution: A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 418, Article 126245. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126245>
68. Catarino, A. I., Macchia, V., Sanderson, W. G., Thompson, R. C., Henry, T. B. (2018). Low levels of microplastics (MP) in wild mussels indicate that MP ingestion by humans is minimal compared to exposure via household fibres fallout during a meal. *Environmental Pollution*, 237, 675–684. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.02.069>
69. Alfaro-Núñez, A., Astorga, D., Cáceres-Farías, L., Bastidas, L., Soto Villegas, C., Macay, K. et al. (2021). Microplastic pollution in seawater and marine organisms across the Tropical Eastern Pacific and Galápagos. *Scientific Reports*, 11(1), Article 6424. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85939-3>
70. Mason, S. A., Welch, V. G., Neratko, J. (2018). Synthetic polymer contamination in bottled water. *Frontiers in Chemistry*, 6, Article 407. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00407>
71. Mintenig, S. M., Löder, M. G., Primpke, S., Gerdts, G. (2019). Low numbers of microplastics detected in drinking water from ground water sources. *Science of the Total Environment*, 648, 631–635. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.178>
72. World Wide Fund For Nature (2019). No plastic in nature: Assessing plastic ingestion from nature to people. Retrieved from https://wwfint.awsassets.panda.org/downloads/plastic_ingestion_web_spreads.pdf Accessed April 15, 2024.
73. Lithner, D., Larsson, Å., Dave, G. (2011). Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition. *Science of the Total Environment*, 409(18), 3309–3324. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.04.038>
74. Li, J., Yang, D., Li, L., Jabben, K., Shi, H. (2015). Microplastics in commercial bivalves from China. *Environmental Pollution*, 207, 190–195. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.09.018>
75. Devriese, L. I., van der Meulen, M. D., Maes, T., Bekaert, K., Paul-Pont, I., Frère, L. et al. (2015). Microplastic contamination in brown shrimp (*Crangon crangon*, Linnaeus 1758) from coastal waters of the Southern North Sea and Channel area. *Marine Pollution Bulletin*, 98(1–2), 179–187. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.06.051>
76. Gall, S. C., Thompson, R. C. (2015). The impact of debris on marine life. *Marine Pollution Bulletin*, 92(1–2), 170–179. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.12.041>
77. Liebezeit, G., Liebezeit, E. (2014). Synthetic particles as contaminants in German beers. *Food Additives and Contaminants: Part A*, 31(9), 1574–1578. <https://doi.org/10.1080/19440049.2014.945099>
78. Liebezeit, G., Liebezeit, E. (2013). Non-pollen particulates in honey and sugar. *Food Additives and Contaminants: Part A*, 30(12), 2136–2140. <https://doi.org/10.1080/19440049.2013.843025>

79. Yang, D., Shi, H., Li, L., Li, J., Jabeen, K., Kolandhasamy, P. (2015). Microplastic pollution in table salts from China. *Environmental Science and Technology*, 49(22), 13622–13627. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03163>
80. Schneider, M., Stracke, F., Hansen, S., Schaefer, U. F. (2009). Nanoparticles and their interactions with the dermal barrier. *Dermato-Endocrinology*, 1(4), 197–206. <https://doi.org/10.4161/derm.1.4.9501>
81. Alvarez-Román, R., Naik, A., Kalia, Y. N., Guy, R. H., Fessi, H. (2004). Skin penetration and distribution of polymeric nanoparticles. *Journal of Controlled Release*, 99(1), 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2004.06.015>
82. Campbell, C. S. J., Contreras-Rojas, L. R., Delgado-Charro, M. B., Guy, R. H. (2012). Objective assessment of nanoparticle disposition in mammalian skin after topical exposure. *Journal of Controlled Release*, 162(1), 201–207. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2012.06.024>
83. Hernandez, L. M., Yousefi, N., Tufenkji, N. (2017). Are there nanoplastics in your personal care products? *Environmental Science and Technology Letters*, 4(7), 280–285. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.7b00187>
84. Gehr, P., Bachofen, M., Weibel, E. R. (1978). The normal human lung: Ultrastructure and morphometric estimation of diffusion capacity. *Respiration Physiology*, 32(2), 121–140. [https://doi.org/10.1016/0034-5687\(78\)90104-4](https://doi.org/10.1016/0034-5687(78)90104-4)
85. Rothen-Rutishauser, B., Blank, F., Mühlfeld, C., Gehr, P. (2008). In vitro models of the human epithelial airway barrier to study the toxic potential of particulate matter. *Expert Opinion on Drug Metabolism and Toxicology*, 4(8), 1075–1089. <https://doi.org/10.1517/17425255.4.8.1075>
86. Borm, P. J. A., Kreyling, W. (2004). Toxicological hazards of inhaled nanoparticles – potential implications for drug delivery. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 4(5), 521–531. <https://doi.org/10.1166/jnn.2004.081>
87. Huang, D., Tao, J., Cheng, M., Deng, R., Chen, S., Yin, L. et al. (2021). Microplastics and nanoplastics in the environment: Macroscopic transport and effects on creatures. *Journal of Hazardous Materials*, 407, Article 124399. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124399>
88. Wang, C., Zhao, J., Xing, B. (2021). Environmental source, fate, and toxicity of microplastics. *Journal of Hazardous Materials*, 407, Article 124357. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124357>
89. Yaka, M., Ehrichou, A., Alkandry, T. T. S., Sair, K. (2015). Huge plastic bezoar: A rare cause of gastrointestinal obstruction. *Pan African Medical Journal*, 21(1), Article 286. <https://doi.org/10.11604/pamj.2015.21.286.7169>
90. Ramasamy, B. S. S., Palanisamy, S. (2021). A review on occurrence, characteristics, toxicology and treatment of nanoplastic waste in the environment. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(32), 43258–43273. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14883-6>
91. Adeniran, A. A., Shakantu, W. (2022). The health and environmental impact of plastic waste disposal in South African Townships: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(2), Article 779. <https://doi.org/10.3390/ijerph19020779>
92. Valsesia, A., Parot, J., Ponti, J., Mehn, D., Marino, R., Melillo, D. et al. (2021). Detection, counting and characterization of nanoplastics in marine bioindicators: A proof of principle study. *Microplastics and Nanoplastics*, 1(1), Article 5. <https://doi.org/10.1186/s43591-021-00005-z>
93. Mahler, G. J., Esch, M. B., Tako, E., Southard, T. L., Archer, S. D., Glahn, R. P. et al. (2012). Oral exposure to polystyrene nanoparticles affects iron absorption. *Nature Nanotechnology*, 7(4), 264–271. <https://doi.org/10.1038/nnano.2012.3>
94. World Health Organization. (2019). Microplastics in drinking-water. Retrieved from <https://www.geatech.eu/wp-content/uploads/2019/08/MICROPLASTICS-IN-DRINKING-WATER.pdf> Accessed April 15, 2024
95. Benford, D., Bolger, P. M., Carthew, P., Coulet, M., DiNovi, M., Leblanc, J.-C. et al. (2010). Application of the Margin of Exposure (MOE) approach to substances in food that are genotoxic and carcinogenic. *Food and Chemical Toxicology*, 48, S2–S24. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2009.11.003>
96. Ragusa, A., Svelato, A., Santacroce, C., Catalano, P., Notarstefano, V., Carnevali, O. et al. (2021). Plastics: First evidence of microplastics in human placenta. *Environment International*, 146, Article 106274. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>
97. Pironti, C., Ricciardi, M., Motta, O., Miele, Y., Proto, A., Montano, L. (2021). Microplastics in the environment: Intake through the food web, human exposure and toxicological effects. *Toxics*, 9(9), Article 224. <https://doi.org/10.3390/toxics9090224>
98. Fries, E., Dekiff, J. H., Willmeyer, J., Nuelle, M. T., Ebert, M., Remy, D. (2013). Identification of polymer types and additives in marine microplastic particles using pyrolysis-GC/MS and scanning electron microscopy. *Environmental Science: Processes and Impacts*, 15(10), 1949–1956. <https://doi.org/10.1039/c3em00214d>
99. Ricciardi, M., Pironti, C., Motta, O., Miele, Y., Proto, A., Montano, L. (2021). Microplastics in the aquatic environment: Occurrence, persistence, analysis, and human exposure. *Water*, 13(7), Article 973. <https://doi.org/10.3390/w13070973>
100. Srivastava, A., Srivastava, A. (2020). Microplastics: An Emerging Threat to the Aquatic Ecosystem. Chapter in a book: *Environmental Biotechnology Vol. 1. Environmental Chemistry for a Sustainable World*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-38192-9_5
101. Arzhakova, O. G., Arzhakov, M. S., Badamshina, E. R., Bryuzgina, E. B., Bryuzgin, E. V., Bystrova, A. V. E. et al. (2022). Polymers for the future. *Russian Chemical Reviews*, 91(12), Article RCR5062. <https://doi.org/10.57634/RCR5062>
102. Thompson, R. C., Olsen, Y., Mitchell, R. P., Davis, A., Rowland, S. J., John, A. W. G. et al. (2004). Lost at sea: Where is all the plastic? *Science*, 304(5672), 838–838. <https://doi.org/10.1126/science.1094559>
103. Frias, J. P. G. L., Otero, V., Sobral, P. (2014). Evidence of microplastics in samples of zooplankton from Portuguese coastal waters. *Marine Environmental Research*, 95, 89–95. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2014.01.001>
104. Vianello, A., Boldrin, A., Guerriero, P., Moschino, V., Rella, R., Sturaro, A. et al. (2013). Microplastic particles in sediments of Lagoon of Venice, Italy: First observations on occurrence, spatial patterns and identification. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 130, 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.03.022>
105. Reddy, M. S., Shaik Basha, Adimurthy, S., Ramachandraiah, G. (2006). Description of the small plastics fragments in marine sediments along the Alang-Sosiya ship-breaking yard, India. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 68(3–4), 656–660. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2006.03.018>
106. Ярославов, А. А., Аржаков, М. С., Хохлов, А. Р. (2022). Одноразовая полимерная упаковка: проблема без решения? *Вестник Российской Академии Наук*, 92(10), 961–970. [Yaroslavov, A. A., Arzhakov, M. S., Khokhlov, A. R. (2022). Single-use polymer packaging: problem without solution? *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, 92(10), 961–970. (In Russian)] <https://doi.org/10.31857/S0869587322100115>
107. Harrison, J. P., Ojeda, J. J., Romero-González, M. E. (2012). The applicability of reflectance micro-Fourier-transform infrared spectroscopy for the detection of synthetic microplastics in marine sediments. *Science of the Total Environment*, 416, 455–463. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.11.078>
108. Wenning, M., Seiler, H., Scherer, S. (2002). Fourier-transform infrared microspectroscopy, a novel and rapid tool for identification of yeasts. *Applied and Environmental Microbiology*, 68(10), 4717–4721. <https://doi.org/10.1128/AEM.68.10.4717-4721.2002>
109. Ojeda, J. J., Romero-Gonzalez, M. E., Banwart, S. A. (2009). Analysis of bacteria on steel surfaces using reflectance micro-Fourier transform infrared spectroscopy. *Analytical Chemistry*, 81(15), 6467–6473. <https://doi.org/10.1021/ac900841c>
110. Wesch, C., Elert, A. M., Wörner, M., Braun, U., Klein, R., Paulus, M. (2017). Assessing quality in microplastic monitoring: About the value of clean-air devices as essentials for verified data. *Scientific Reports*, 7(1), Article 5424. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05838-4>
111. PhysicsOpenLab (2022). Polymer Analysis using Raman Spectroscopy. Retrieved from <https://physicsopenlab.org/2022/05/08/polymer-analysis-using-raman-spectroscopy/> Accessed April 15, 2024
112. Kwak, J. I., An, Y.-J. (2021). Microplastic digestion generates fragmented nanoplastics in soils and damages earthworm spermatogenesis and coelomocyte viability. *Journal of Hazardous Materials*, 402, Article 124034. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124034>
113. Liu, Z., Li, Y., Pérez, E., Jiang, Q., Chen, Q., Jiao, Y. et al. (2021). Polystyrene nanoplastic induces oxidative stress, immune defense, and glycometabolism change in *Daphnia pulex*: Application of transcriptome profiling in risk assessment of nanoplastics. *Journal of Hazardous Materials*, 402, Article 123778. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123778>
114. Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson, R. C., Thiel, M. (2012). Microplastics in the marine environment: A review of the methods used for identification and quantification. *Environmental Science and Technology*, 46(6), 3060–3075. <https://doi.org/10.1021/es2031505>
115. Horton, A. A., Svendsen, C., Williams, R. J., Spurgeon, D. J., Lahive, E. (2017). Large microplastic particles in sediments of tributaries of the River Thames, UK—Abundance, sources and methods for effective quantification. *Marine Pollution Bulletin*, 114(1), 218–226. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.09.004>
116. Primpke, S., Lorenz, C., Rascher-Friesenhausen, R., Gerdt, G. (2017). An automated approach for microplastics analysis using focal plane array (FPA) FTIR microscopy and image analysis. *Analytical Methods*, 9(9), 1499–1511. <https://doi.org/10.1039/c6ay02476a>
117. Koelmans, A. A., Besseling, E., Shim, W. J. (2015). Nanoplastics in the aquatic environment. Critical review. Chapter in a book: *Marine anthropogenic litter*. Springer, Cham, 2015. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_12

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	
Принадлежность к организации	
Мяленко Дмитрий Михайлович — кандидат технических наук, заведующий Лабораторией технологий упаковки, Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности 115093, Москва, Люсиновская, 35/7 Тел.: +7–916–854–18–24 E-mail: d_myalenko@vnimi.org ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6342-7218	
Критерии авторства	
Автор имеет единоличное отношение к написанию рукописи и несет ответственность за плагиат	
Конфликт интересов	
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов	
AUTHOR INFORMATION	
Affiliation	
Dmitry M. Myalenko , Candidate of Technical Sciences, Head of Packaging Sector, All-Russian Dairy Research Institute 35/7, Lucinovskaya str., Moscow, Russia Tel.: +7–916–854–18–24 E-mail: d_myalenko@vnimi.org ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6342-7218	
Contribution	
The author has the sole responsibility for writing the manuscript and is responsible for plagiarism	
Conflict of interest	
The author declare no conflict of interest	