

Микро- и нанопластик. Абрис проблемы

Б. Л. Мильман¹, И. К. Журкович¹

УДК 678

Эта публикация – краткий обзор проблем, связанных с микро- (МП) и нанопластиком (НП) – мелкими полимерными частицами, загрязняющими окружающую среду и представляющими угрозу экосистемам и здоровью человека. Рассмотрены характеристики МП и НП, источники их попадания в окружающую среду, воздействие на живые организмы. Выделены различные области изучения МП и НП. При обилии проведенных работ наблюдается их некоторая фрагментарность, отсутствует единое и цельное понимание угроз здоровью человека.

Ключевые слова: микропластик, нанопластик, окружающая среда, токсикология, химический анализ полимеров

Введение

Мировое производство полимеров (пластика, пластмасс) и полимерной продукции в последние десятилетия достигло столь больших размеров (~350 млн т в 2018 году [1]), что породило термин «эра пластика». Когда срок использования изделий из пластика заканчивается, только 6% этой продукции перерабатывается. Судьба остальной части: 39% пластика сжигается, 31% – выбрасывается на свалку, остальное попадает в окружающую среду [2]. Соответствующие экологические угрозы обусловлены прежде всего не столько крупным пластиковым мусором (макропластик), сколько небольшими частицами, образующимися из пластика при побочных процессах производства, по мере использования этих изделий, при их износе, переработке и деградации, в том числе, конечно, в самой окружающей среде (рис. 1). Например, ежегодно в атмосферу по всему земному шару попадает 2,9 млн т мелких частиц, образующихся при износе шин [1]. Мелкие полимерные частицы различного происхождения: микропластик (МП, размер <5 мм) и нанопластик (НП, <1 мкм) (терминология, например см. [4]) – наиболее опасны для живых организмов и экосистем в целом. Обе разновидности частиц вместе будем называть МП, если не надо выделить НП с характерными для него свойствами.

Рассматривают первичный и вторичный МП (рис. 1). Первичный МП изначально производится в виде малых зерен, используемых как пластификаторы, прежде всего, в средствах личной гигиены (кремы, гели и др.). Первичным МП также считают микроволокна, образующиеся при домашней стирке одежды из синтетических тканей. Вторичные частицы МП высвобождаются в результате деградации сравнительно больших пластиковых изделий при их производстве, на мусорных свалках, в морском мусоре и других объектах – в результате механической и биodeградации, фото-, окислительных и термических процессов разложения. МП неизбежно попадает в окружающую среду и далее возвращается к человеку вместе с вдыхаемым воздухом, пищей и напитками (рис. 1).

Важность проблем, связанных с МП, осознается химиками-аналитиками. Определение микропластика – одна из «горячих» областей развития аналитической химии [5].

Различные аспекты появления, видоизменения, характеристики, распространения и опасности МП выясняют на протяжении последних 15 лет, и результаты соответствующих исследований рассеяны по многим тысячам публикаций. Для научных и практических работников многих специальностей, однако, важны и короткие обобщающие статьи, которые служили бы введением в проблему МП. Суммирование результатов многочисленных оригинальных публикаций в виде

¹ ФГБУ «НКЦТ им. С.Н. Голикова ФМБА России».

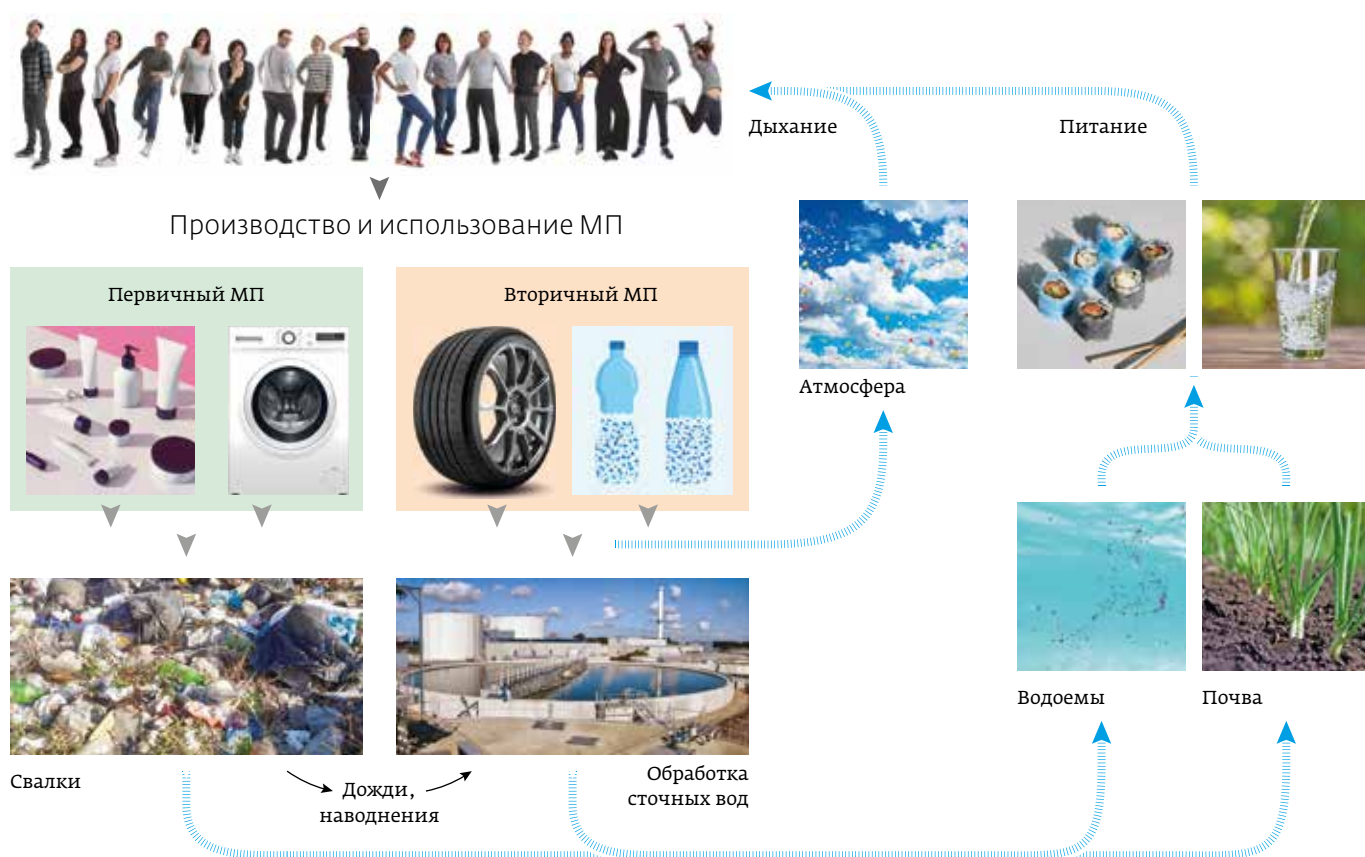


Рис. 1. Жизненный цикл микропластика, адаптирован из работы [3]

коротких выводов представляло бы само по себе неосуществимую задачу, но, к счастью, опубликовано также достаточно большое количество систематических обзорных работ, в том числе выражающих мнение больших групп экспертов [6]. Это существенно облегчило подготовку настоящей статьи, которая представляет собой сжатое описание проблем, связанных с МП, введение в эту область исследований, ее общие очертания (абрис). Кратко охарактеризован сам МП, указаны темы релевантных исследований, отмечены опасность для здоровья человека и перспективы уменьшения этой угрозы.

Характеристика МП как загрязнителя окружающей среды

МП как загрязнитель окружающей среды далеко не однороден, он представляет собой широкий набор частиц различного химического состава, размера, морфологии и др. (рис. 2). Основные полимерные виды МП представлены в табл. 1; в биологических пробах, например, обнаружены и другие полимеры [9]. Токсикологические и другие эффекты

Таблица 1. Основные виды МП [7, 8]

Полимер*	Примеры изделия [8]
Полиэтилен (ПЭ)	Очищающие средства для лица, зубная паста
Полиэтилен низкой плотности (ПЭНП)	Пластиковые пакеты, бутылки, соломинки, рыболовные сети
Полиэтилен высокой плотности	Упаковки для молока, соков, косметики
Поливинилхлорид (ПВХ)	Пленка, посуда
Полиэтилентерефталат (ПЭТ)	Бутылки
Полипропилен (ПП)	Веревки, крышки для бутылок
Полистирол (ПС)	Контейнеры для пищи, посуда
Пенополистирол (ППС)	Буйки, коробки, одноразовая посуда
Полиамид (ПА)	Рыболовные сети **

* На эти полимеры приходится более 90% мирового производства. Кроме них, часто обнаруживают МП из полиэфиров (ПЭ) и резины [7].

** И, очевидно, синтетические ткани.



Рис. 2. Микро- и нанопластик как мелкая часть пластикового мусора

МП зависят не только от природы полимера, но и от размера и морфологии частиц, присутствия в них других химических соединений [1]. Так, МП крупных размеров достаточно легко попадает в кишечно-желудочный тракт животных, что в случае мелких особей может представлять жизненную угрозу. Более мелкие частицы, преодолевая клеточные мембраны, попадают и в другие органы, что повышает опасность для жизни человека и животных.

По своей форме МП классифицируется в соответствии с табл. 2. Особую угрозу представляет МП волокнистого типа, с большой вероятностью попадающий в атмосферу и организм человека через дыхание, вызывая воспалительные процессы в легких [1]. От формы МП, а не только от химической природы, зависит также скорость его превращений: деструкции, химического, термического и фоторазложения, сорбции на МП низкомолекулярных токсичных соединений и их десорбции [7]. Эти процессы изменяют концентрацию МП в объектах окружающей среды, влияют на угрозы биоте. Важны также другие характеристики МП, такие как плотность, от чего зависит распределение МП по различным слоям воды в водоемах [7].

Содержание МП в окружающей среде варьируется в широких пределах и в некоторых случаях достаточно хорошо измерено. Указывают на концентрацию МП вплоть до сотен и тысяч частиц/м³ в морской воде и некоторых пресных водоемах; обнаружено до ~3000 частиц/м² в донных отложениях пляжной полосы [10–12]. Концентрация в воздухе производственных помещений может подниматься до уровня ~1500 частиц/м³; для атмосферного воздуха характерны, по-видимому, меньшие средние значения [13–15]. Измерено содержание МП в рыбах, обитающих в Средиземном море: в среднем, несколько частиц в одной особи [16].

Основные направления исследований МП

Тематика основных групп научных работ указана в табл. 3 вместе с соответствующими ссылками и некоторыми фактами. Существенная часть отмеченной литературы представляет собой своеобразные систематические обзоры, включающие библиометрическую (наукометрическую) часть – статистику публикаций, ключевых слов, авторов, исследовательских организаций, стран, а также оценку связей между этими объектами статистики. Такого рода обобщающие работы, пусть не всегда глубокие в отношении физико-химических аспектов МП, хорошо передают, тем не менее, общую картину обсуждаемых исследований и богаты ключевыми ссылками.

Угрозы здоровью человека и возможности их устранения

Эти угрозы весьма многочисленны, но полны неопределенностей. И те и другие суммированы в отчете ВОЗ, выпущенном в 2022 году [6]. Выводы этого отчета, приведенные ниже, в целом, вряд

Таблица 2. Формы МП [7]

Форма	Комментарии
Микросферы, зерна	Первичный МП размером менее 1 мм, который содержится в косметических товарах. В основном ПЭНП, а также ПП и ПС
Пенопласты	Вторичный МП, часто встречается в морской воде. Источник: ППС (поплавки, подушки)
Фрагменты	Результат нерегулярной фрагментации изделий из пластика
Листы	Из металлизированной (Al, Ti, Fe, Bi) разновидности ПЭТ
Волокна	Стирка изделий из синтетических волокон (60% от общего объема мирового производства волокон), преобладают ПП, ПА, ПЭТ и ПЭ
Пленки	Результат фрагментации полиэтиленовых пленок, используемых в сельскохозяйственной практике

Таблица 3. Основные направления научных исследований в области МП

Тема исследований и ссылки	Факты и комментарии
МП в целом [2, 3, 7, 9, 10, 12, 17, 18]	К 2023 году опубликовано более 10 тыс. статей, резкий рост публикаций в последнее десятилетие [12, 18]
НП [19–26]	Быстрый рост числа работ начиная с 2018 года [22]. Частицы НП имеют сравнительно большую удельную поверхность, на которой сорбируются различные молекулы (образование “короны”), что определяет особую опасность воздействия этих частиц [23, 24]
МП в водных средах/экосистемах [7, 14, 20, 25, 27–31]	В исследованиях преобладают морские водоемы
МП в морской воде [11, 16, 28, 29, 32, 33]	МП попадает в морские организмы (путем поглощения, проглатывания), что влияет на их физиологию и поведение. Далее происходит трансформация и бионакопление МП вдоль пищевой цепи, что угрожает морскому биоразнообразию, экологическому балансу и устойчивому использованию морских ресурсов [32]
МП в пресной воде [28, 34, 35]	Опубликованы обзоры по МП в озерах [34] и реках [35]
МП в сточной воде [36, 37]	Двойная роль водоочистных сооружений: источник МП и одновременно место его возможного сбора и удаления [37]
МП в почве [7, 21, 38–44]	Изменение структуры почвы. Воздействие на микроорганизмы и растения, попадание в продукты питания растительного происхождения [39]
МП в воздухе /атмосфере [7, 14, 15, 45]	Обнаруживают МП в воздушной среде и осадках (ПЭТ, ПЭ, ПП), в пыли (эти же полимеры, а также ПВХ и ПА) [15]
МП в помещении [13, 15, 46]	Виды полимеров и размеры частиц – те же самые, что в окружающем воздухе, но концентрация частиц может быть выше [15]
МП в пище [1, 33, 40, 47, 48]	Пероральный канал имеет существенное значение для попадания МП (ПЭ, ПП, ПС, ПВХ, ПЭТ, ПА) в человеческий организм. Отмечена опасность добавок к полимерам (бисфенол А, фталаты, металлы) и различных продуктов деградации МП [1, 48]
Средства личной гигиены (косметика) [49]	Из этого источника в мировой океан ежегодно попадает 12 тыс. т первичного МП (ПЭ) [49]
Переработка и отходы пластика [17, 50–53]	Рациональное обращение с пластиковыми отходами может уменьшить загрязнение природы МП. Существуют различные стратегии в работе с отходами, например биоразложение пластика, его использование в строительстве [52, 53]
Деградация МП [43, 54, 55]	Несколько путей разложения. Рассматривают искусственную деградацию МП как способ уменьшения загрязнения [55]
Удаление МП, очистка от МП [2, 3, 7, 27, 30, 31, 43, 55, 56]	Для ликвидации загрязнений МП предложены физико-химические (адсорбция, фильтрация, флотация, коагуляция, осаждение и др.) и биологические (использование энзимов, бактерий, грибов, водорослей, насекомых) процессы [7]
Взаимодействие МП с опасными веществами [1, 4, 7, 10, 16, 25, 26, 28, 29, 47, 48, 57–59]	Причиной токсического действия МП может быть сорбция на его поверхности типичных загрязнителей окружающей среды: органических соединений (таких как полихлорбифенилы [10] и лекарственные вещества [58]), тяжелых металлов [57, 59]
МП и биота [7, 19, 21, 42, 56]	МП вызывает истощение энергетических запасов в результате значительного времени пребывания проглоченного материала в кишечнике, снижения активности питания и появления воспалительных процессов. НП может преодолевать эпителиальные барьеры дыхательных путей, желудочно-кишечного тракта и кожи, даже может пересекать клеточные мембраны, попадать в плаценту и мозг. Возможные следствия: различные виды токсичности, воспалительные и иммунные реакции, повреждение клеток и ДНК [7]
МП и растения [19, 24, 40, 42, 56]	Микропластик влияет на рост растений косвенно, воздействуя на почвенных животных и микроорганизмы, и напрямую – через корни растений. Обнаружен ингибирующий эффект при прорастании семян [42]
МП и водные организмы [11, 20, 25, 28, 29, 56, 60–63]	Лучше других изучены рыбы и дафнии. Результаты токсического воздействия: изменение поведения, нарушения метаболизма и иммунного ответа, что угрожает составу и стабильности экосистемы [28]

Тема исследований и ссылки	Факты и комментарии
МП и микроорганизмы [24, 28, 39, 42, 56, 64]	Микроорганизмы могут способствовать деградации МП, в большей степени – в микробных сообществах [64]
Токсикология, здоровье человека [1, 3, 4, 9, 11, 14, 20, 23–26, 28, 31, 38, 39–41, 43, 44, 48, 50, 57, 61–63, 65]	Присутствие (в результате дыхания, потребления пищи и напитков) и перемещение МП в организме человека потенциально может приводить к окислительному стрессу, воспалению, раку [1]. К действию МП весьма чувствителен желудочно-кишечный тракт [4]. Влияние МП на здоровье человека в целом остается неясным
Аналитика: выделение, обнаружение и идентификация МП [4, 9, 11, 12, 13, 22, 25, 28, 33, 37, 44, 45, 47]	В выделении и разделении МП используют флотацию, фильтрование, экстракцию, химическую и ферментативную обработку. Флотация рассматривается как наиболее быстрый и простой вариант извлечения МП из водных образцов. Детектируют и идентифицируют, применяя оптическую и электронную микроскопию, ИК- и рамановскую спектроскопию, газовую хроматографию – масс-спектрометрию (ГХ-МС). Для подсчета числа частиц МП хорошо подходят методы микроскопии. Техника ГХ-МС применяется и для количественного определения МП [33]
Связь с пандемией COVID и изменением климата [7, 51, 66, 67]	Борьба с пандемией COVID-19 привела к резкому увеличению количества пластиковых отходов и соответственно МП [51, 66]. При деградации МП выделяются парниковые газы (углекислота, метан). Под влиянием МП возможно снижение поглощения углекислоты растениями, что дополнительно усиливает глобальный парниковый эффект [67]

ли устарели, поскольку совпадают с умозаключениями авторов многих более поздних работ, указанных в табл. 3.

1. Измерения концентрации МП в воздухе, продуктах питания и напитках проведены лишь в ограниченном числе мест и лишь для нескольких категорий продуктов питания, что позволяет получить только грубые оценки воздействия МП на человека. Отсутствует достаточное количество данных о влиянии вдыхаемой фракции частиц; имеющейся информации этого вида недостаточно для количественной оценки общего воздействия на человека. Поскольку имеются лишь ограниченные сведения о количестве и составе МП в воздухе, воде, продуктах питания и напитках, наиболее опасные источники МП определить невозможно.
2. Необходимо оценить возможность попадания МП из воздуха в продукты питания и напитки путем адсорбции, что позволит определить количество пластика, поступающего в организм из воздушной среды. Поэтому важна информация о вероятностных распределениях адсорбированных и попавших в организм частиц по их физико-химическим свойствам, таким как размер, форма, объемный и поверхностный химический состав. Необходимы и другие характеристики, определяющие экологически значимое воздействие МП. Расхождения в этих свойствах МП определяет различия в их экологическом воздействии, хотя неизвестно, какие из перечисленных характеристик наиболее важны для определения размера экологических

эффектов. Далее, текущих знаний также недостаточно для того, чтобы отличить неблагоприятные эффекты, связанные с воздействием МП, от действия других частиц, встречающихся в пище или вдыхаемом воздухе. Имеющиеся в литературе данные о том, что вдыхание или пероральное потребление МП может влиять на желудочно-кишечный тракт или другие органы (кроме легких), малочисленны и требуют проверки. Выводы о токсичности, сопровождающей ингаляционное или пищевое воздействие МП, ограничены исследованиями с использованием полистирольных шариков.

3. Признана роль МП как переносчика химических веществ, связанных с пластмассами, других загрязняющих соединений и патогенов. Неясно, однако, представляет ли десорбция/высвобождение веществ, связанных с МП, риск для здоровья человека.
4. Недостатки выполненных исследований, не позволяющие провести оценки риска, представляют собой отсутствие релевантных выборок данных и необходимого экспериментального дизайна исследований, а также несоответствие проводимых экспериментов в экспериментальных системах с монодисперсным МП – реальной природе МП (сложная смесь разнородных частиц), присутствующего в окружающей среде. Далее, имеющихся данных недостаточно для того, чтобы определить, может ли человек подвергнуться воздействию патогенов, связанных с микропластиком, и связано ли воздействие МП с какой-либо прямой или косвенной

определенной патологией. В целом, характеристика и количественная оценка воздействия МП на здоровье человека являются неполными и недостаточными для оценки риска, и следует продолжать мониторинг этого потенциального воздействия.

5. Необходимы стандартизация и повышение качества методов отбора проб и определения МП в воздухе, воде, пищевых продуктах и напитках, а также разработка стандартных образцов МП, релевантных его видам, присутствующим в окружающей среде.
6. Радикальное общее решение проблемы МП – резкое уменьшение поступления всего пластика в окружающую среду: сокращение и рациональное его использование, более эффективная переработка отходов. Уменьшение воздействия МП – фактор снижения любого из рисков, любой угрозы здоровью. Стратегии более эффективного использования пластика и контроля этих процессов имеют решающее значение для минимизации воздействия МП. Необходимо пресекать появление пластиковых отходов и замусоривание территорий и водоемов.

Изучение микропластика в России

Исследователи в нашей стране активно включились в работы, связанные с МП. Появились многие сотни публикаций на русском языке, отражающих, например, ситуацию с загрязнением отечественных водоемов [68]. Вышли первые монографии [69, 70]. В Новгороде проходят Всероссийские конференции «Микропластик в науке о полимерах» [71]. Проблемам анализа нано- и микропластика посвящено специальное заседание Московского семинара по аналитической химии (16.01.2024, доклады М. А. Проскурнина (МГУ), Е. Г. Багрянской и сотр. (Новосибирский ИОХ) и М. С. Ермолина (ГЕОХИ) [72].

Отечественными авторами подчеркивается острая необходимость сокращения отходов пластика [73]. Соответственно, Правительство РФ увеличивает нормативы утилизации отходов: для изделий из пластмассы – от 15% в 2024 г. до 65% в 2029 г. [74].

Заключение

Многочисленные угрозы окружающей среде и здоровью человека со стороны МП – откровенный вывод многих публикаций по этой теме. Одновременно признаются многочисленные пробелы в общем понимании таких угроз и способах оценки риска – как следствие фрагментарности и неполноты

проведенных исследований. Таким образом, формирование корректной и гораздо более полной картины экологических и токсикологических угроз и рисков требует новых исследований. Снижение уровня пластика, попадающего в окружающую среду, представляет собой радикальную меру по устранению этих опасностей. Неясно, однако, насколько это достижимо в ближайшие годы.

Литература

1. Ebrahimi P., Abbasi S., Pashaei R., Bogusz A., Oleszczuk P. Investigating impact of physicochemical properties of microplastics on human health: A short bibliometric analysis and review. *Chemosphere*. 2022; 289: 133146.
2. Bakhshoodeh R., Santos R. M. Comparative bibliometric trends of microplastics and perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances: how these hot environmental remediation research topics developed over time. *RSC advances*. 2022; 12(8): 4973–4987.
3. Bird R., Yu X., Catanescu O., Gupta S., Diaz L. M. L., Georges G. Microplastics: research landscape, challenges, and remediation. *ChemRxiv*. 2022; Doi: 10.26434/chemrxiv-2022-xwv9h.
4. Mittal N., Tiwari N., Singh D., Tripathi P., Sharma S. Toxicological impacts of microplastics on human health: a bibliometric analysis. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023; Doi: 10.1007/s11356-023-30801-4.
5. Мильман Б. Л., Журкович И. К. Карта аналитики – 2022: миниатюрные приборы, COVID-19, микропластик, глубокая эвтектика. *АНАЛИТИКА*. 2023; 13(5): 360–365.
6. *Dietary and inhalation exposure to nano- and microplastic particles and potential implications for human health*. Geneva: World Health Organization. 2022. 139p. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240054608>
7. Nohara N. M. L., Ariza-Tarazona M. C., Triboni E. R., Nohara E. L., Villarreal-Chiu J. F., Cedillo-González E. I. Are you drowned in microplastic pollution? A brief insight on the current knowledge for early career researchers developing novel remediation strategies. *Science of the Total Environment*. 2024; 918: 170382.
8. Jin M., Liu J., Yu J., Zhou Q., Wu W., Fu L., Yin C., Fernandez C., Karimi-Maleh H. Current development and future challenges in microplastic detection techniques: A bibliometrics-based analysis and review. *Science Progress*. 2022; 105(4): 1–22.
9. Liu M., Liu J., Xiong F., Xu K., Pu Y., Huang J., Zhang J., Pu Y., Sun R., Cheng K. Research advances of microplastics and potential health risks of microplastics on terrestrial higher mammals: a bibliometric analysis and literature review. *Environmental Geochemistry and Health*. 2023; 45(6): 2803–2838.
10. Yu Q., Hu X., Yang B., Zhang G., Wang J., Ling W. Distribution, abundance and risks of microplastics in the environment. *Chemosphere*. 2020; 249: 126059.
11. Wu M., Jiang Y., Kwong R. W., Brar S. K., Zhong H., Ji R. How do humans recognize and face challenges of microplastic pollution in marine environments? A bibliometric analysis. *Environmental Pollution*. 2021; 280: 116959.
12. Wang Y., Zhang B., Zhang R., Wei Y., Wang Y., Zhu R. Microplastic Pollution Research Based on the VOS Viewer Software: Research Trends, Ecological Effects, and Testing Methods. *Atmosphere*. 2023; 14(5): 838.
13. Bhat M. A. Indoor microplastics: a comprehensive review and bibliometric analysis. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023; 30(58): 121269–121291.
14. Bao M., Xiang X., Huang J., Kong L., Wu J., Cheng S. Microplastics in the atmosphere and water bodies of coastal agglomerations: a mini-review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2023; 20(3): 2466.

15. O'Brien S., Rauert C., Ribeiro F., Okoffo E. D., Burrows S. D., O'Brien J. W., Wang X., Wright S. L., Thomas K. V. There's something in the air: a review of sources, prevalence and behaviour of microplastics in the atmosphere. *Science of the Total Environment*. 2023; 874: 162193.
16. Papadimitriou M., Allinson G. Microplastics in the Mediterranean marine environment: a combined bibliometric and systematic analysis to identify current trends and challenges. *Microplastics and Nanoplastics*. 2022; 2(1): 8.
17. Adeniji A. O., Okaiyeto K., Mohammed J. N., Mabaleha M., Tanor E. B., George M. J. A mixed method assessment of research productivity on microplastics in various compartments in the environment. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2023; 20(11): 12847–12874.
18. Bhat M. A., Eraslan F. N., Gaga E. O., Gedik K. Scientometric analysis of microplastics across the globe. In: *Microplastics in the ecosystem: air, water, soil, and food*. Wiley, 2023. PP. 3–13.
19. Masson D., Pedrot M., Davranche M., Cabello-Hurtado F., Ryzhenko N., El Amrani, A. Are nanoplastics potentially toxic for plants and rhizobiota? Current knowledge and recommendations. *NanoImpact*. 2023; 31: 100473.
20. Wang J., Zhao X., Wu F., Niu L., Tang Z., Liang W., Zhao T., Fang M., Wang H., Wang X. Characterization, occurrence, environmental behaviors, and risks of nanoplastics in the aquatic environment: current status and future perspectives. *Fundamental Research*. 2021; 1(3): 317–328.
21. Ji Z., Huang Y., Feng Y., Johansen A., Xue J., Tremblay L. A., Li Z. Effects of pristine microplastics and nanoplastics on soil invertebrates: A systematic review and meta-analysis of available data. *Science of the Total Environment*. 2021; 788: 147784.
22. Yu Q., Chuang C. Y. A., Jiang Y., Zhong H., Cundy A., Kwong R. W., Min C., Zhu X., Ji R. Exploring environmental nanoplastics research: networks and evolutionary trends. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. 2023; 261(1): 12.
23. Kihara S., Köper I., Mata J. P., McGillivray D. J. Reviewing nanoplastic toxicology: It's an interface problem. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021; 288: 102337.
24. Giri S., Dimkpa C. O., Ratnasekera D., Mukherjee A. Impact of micro and nano plastics on phototrophic organisms in freshwater and terrestrial ecosystems: A review of exposure, internalization, toxicity mechanisms, and eco-corona-dependent mitigation. *Environmental and Experimental Botany*. 2024; 219: 105666.
25. Shi C., Liu Z., Yu B., Zhang Y., Yang H., Han Y., Wang B., Liu Z., Zhang H. Emergence of nanoplastics in the aquatic environment and possible impacts on aquatic organisms. *Science of the Total Environment*. 2023; 906: 167404.
26. Wang R., Yue S., Huang C., Jia L., Tibihenda C., Li Z., Yu J. Visual mapping of global nanoplastics research progresses and hotspots: a scientometric assessment analysis. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023; 30: 114739–114755.
27. Munien S., Adhikari P. L., Reycraft K., Mays T. J., Naidoo T., Pruitt M., Arena J., Sershen. Application and Efficacy of Management Interventions for the Control of Microplastics in Freshwater Bodies: A Systematic Review. *Water*. 2024; 16(1): 176.
28. Li X., Chen Y., Zhang S., Dong Y., Pang Q., Lynch I., Xie C., Guo Z., Zhang P. From marine to freshwater environment: A review of the ecotoxicological effects of microplastics. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2023; 251: 114564.
29. Porcino N., Bottari T., Mancuso M. Is wild marine biota affected by microplastics? *Animals*. 2022; 13(1): 147.
30. Renzi M., Pauna V. H., Provenza F., Munari C., Mistri M. Marine litter in transitional water ecosystems: state of the art review based on a bibliometric analysis. *Water*. 2020; 12(2): 612.
31. Ahmed A. S., Billah M. M., Ali M. M., Bhuiyan M. K. A., Guo L., Mohinuzzaman M., Hossain M. B., Rahman M. S., Islam M. S., Yan M., Cai W. Microplastics in aquatic environments: A comprehensive review of toxicity, removal, and remediation strategies. *Science of the Total Environment*. 2023; 876: 162414.
32. Lou X., Sui Y., Fang C., Tang Y., Huang D., Guo Y. Bibliometric analysis for global marine microplastic pollution control from 2013 to 2022. *Frontiers in Environmental Science*. 2023; 11: 1215317.
33. Sridhar A., Kannan D., Kapoor A., Prabhakar S. Extraction and detection methods of microplastics in food and marine systems: a critical review. *Chemosphere*. 2022; 286: 131653.
34. Pan T., Liao H., Yang F., Sun F., Guo Y., Yang H., Feng D., Zhou X., Wang Q. Review of microplastics in lakes: sources, distribution characteristics, and environmental effects. *Carbon Research*. 2023; 2(1): 25.
35. Leal Filho W., Dedeoglu C., Dinis M. A. P., Salvia A. L., Barbir J., Voronova V., Abubakar I. R., Iital A., Pachel K., Huthoff F., Sharifi A., Yang P. J., Klavins M., Emanche V. O. Riverine plastic pollution in Asia: results from a bibliometric assessment. *Land*. 2022; 11(7): 1117.
36. Palmas S., Vacca A., Mais L. Bibliometric analysis on the papers dedicated to microplastics in wastewater treatments. *Catalysts*. 2021; 11(8): 913.
37. Kang P., Ji B., Zhao Y., Wei T. How can we trace microplastics in wastewater treatment plants: A review of the current knowledge on their analysis approaches. *Science of the Total Environment*. 2020; 745: 140943.
38. Guo S., Wang Q., Li Z., Chen Y., Li H., Zhang J., Wang X., Liu J., Cao B., Zou G., Zhang B., Zhao M. Ecological risk of microplastic toxicity to earthworms in soil: A bibliometric analysis. *Frontiers in Environmental Science*. 2023; 11: 1126847.
39. Sun Y., Yang C., Liang H., Zhang S., Zhang R., Dong Y., Tanveer S. K., Hai J. Health risk analysis of microplastics in soil in the 21st century: A scientometrics review. *Frontiers in Environmental Science*. 2022; 10: 976237.
40. He D., Zhang Y., Gao W. Micro (nano) plastic contaminations from soils to plants: human food risks. *Current Opinion in Food Science*. 2021; 41: 116–121.
41. Liu H., Cui L., Li T., Schillaci C., Song X., Pastorino P., Zou H., Cui X., Xu Z., Fantke P. Micro- and nanoplastics in soils: Tracing research progression from comprehensive analysis to ecotoxicological effects. *Ecological Indicators*. 2023; 156: 111109.
42. Ya-di Z., Tian-jie S., Yan-hua W., Rui-yuan W. Review and future trends of soil microplastics research: visual analysis based on Citespace. *Environmental Sciences Europe*. 2022; 34(1): 122.
43. Yang T., Liu J., Zhu H., Kong T., Tai S. The Bibliometric Analysis of Microplastics in Soil Environments: Hotspots of Research and Trends of Development. *Sustainability*. 2023; 15(9): 7122.
44. Gautam K., Sadasivam A. Recent trends in analytical measures of microplastic in soil and toxicopathological risk assessment in earthworms. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2023; 168: 117292.
45. Can-Güven E. Microplastics as emerging atmospheric pollutants: a review and bibliometric analysis. *Air Quality, Atmosphere and Health*. 2021; 14(2): 203–215.
46. Mehta N., Kozielska B. A systematic literature review and bibliometric analysis of sources and analytical approaches of indoor microplastics. *Emerging Contaminants*. 2023; 10: 100274.
47. Martín-Gómez B., Elmore J. S., Valverde S., Ares A. M., Bernal J. Recent applications of chromatography for determining microplastics and related compounds (bisphenols and phthalate esters) in food. *Microchemical Journal*. 2024; 197: 109903.
48. Sewwandi M., Wijesekara H., Rajapaksha A. U., Soysa S., Vithanage M. Microplastics and plastics-associated contaminants in food and beverages; Global trends, concentrations, and human exposure. *Environmental Pollution*. 2023. 317: 120747.
49. Sun Q., Ren S. Y., Ni H. G. Incidence of microplastics in personal care products: an appreciable part of plastic pollution. *Science of the Total Environment*. 2020; 742: 140218.
50. Yu Y., Craig N., Su L. A Hidden Pathway for Human Exposure to Micro- and Nanoplastics – The Mechanical Fragmentation of Plastic Products during Daily Use. *Toxics*. 2023; 11(9): 774.

51. De la Torre Bayo J. J., Martín-Lara M. Á., Calero Hoces M., Sánchez Castillo P. M., Pula H. J., Zamorano M. Management of used Covid-19 personal protective equipment: a bibliometric analysis and literature review. *Applied Sciences*. 2023; 13(4): 2377.
52. Huang S., Wang H., Ahmad W., Ahmad A., Vatin N. I., Mohamed A. M., Deifalla A. F., Mehmood I. Plastic waste management strategies and their environmental aspects: A scientometric analysis and comprehensive review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022; 19(8): 4556.
53. Tsuchimoto I., Kajikawa Y. Recycling of plastic waste: a systematic review using bibliometric analysis. *Sustainability*. 2022; 14(24): 16340.
54. Akinpelu E. A., Nchu F. A bibliometric analysis of research trends in biodegradation of plastics. *Polymers*. 2022; 14(13): 2642.
55. Lastovina T. A., Budnyk A. P. A review of methods for extraction, removal, and stimulated degradation of microplastics. *Journal of Water Process Engineering*. 2021; 43: 102209.
56. Verastegui C., Gilvonio N., Flores M. A bibliometrics study of plants, animals, bacteria, algae and technologies that reduce, filter and eliminate microplastics from planet earth, ecological solutions for the environment. *Decision Science Letters*. 2023; 12(4): 773–782.
57. Liu S., Shi J., Wang J., Dai Y., Li H., Li J., Liu X., Chen X., Wang Z., Zhang P. Interactions between microplastics and heavy metals in aquatic environments: a review. *Frontiers in Microbiology*. 2021; 12: 652520.
58. De Souza A. M., Santos A. L., Araújo D. S., De Barros Magalhães R. R., Rocha T. L. Micro (nano) plastics as a vector of pharmaceuticals in aquatic ecosystem: Historical review and future trends. *Journal of Hazardous Materials Advances*. 2022; 6: 100068.
59. Li K., Wang F. Global hotspots and trends in interactions of microplastics and heavy metals: a bibliometric analysis and literature review. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023; 30(41): 93309–93322.
60. Galafassi S., Campanale C., Massarelli C., Uricchio V. F., Volta P. Do freshwater fish eat microplastics? A review with a focus on effects on fish health and predictive traits of MPs ingestion. *Water*. 2021; 13(16): 2214.
61. Geremia E., Muscari Tomajoli M. T., Murano C., Petito A., Fasciolo G. The impact of micro- and nanoplastics on aquatic organisms: Mechanisms of oxidative stress and implications for human health – A review. *Environments*. 2023; 10(9): 161.
62. Zhao W., Chen Y., Hu N., Long D., Cao Y. The uses of zebrafish (*Danio rerio*) as an in vivo model for toxicological studies: A review based on bibliometrics. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2024; 272: 116023.
63. Da Costa Araújo A. P., Rocha T. L., De Melo e Silva D., Malafaia G. Micro (nano) plastics as an emerging risk factor to the health of amphibian: A scientometric and systematic review. *Chemosphere*. 2021; 283: 131090.
64. Jiang Y., Xia W., Zhao R., Wang M., Tang J., Wei Y. Insight into the interaction between microplastics and microorganisms based on a bibliometric and visualized analysis. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 2021; 107: 585–596.
65. Mittal N., Tiwari N., Singh D., Tripathi P., Sharma S. A Bibliometric Analysis of Toxicological Impacts of Microplastics in the Environment. *Research Square*, 24 Mar 2023. URL: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2637831/v1>.
66. Wang Q., Huang R., Li R. Impact of the COVID-19 pandemic on research on marine plastic pollution—A bibliometric-based assessment. *Marine Policy*. 2022; 146: 105285.
67. Li K., Du L., Qin C., Bolan N., Wang H., Wang H. Microplastic pollution as an environmental risk exacerbating the greenhouse effect and climate change: a review. *Carbon Research*. 2024; 3(1): 9.
68. Статьи по МП и НП на русском языке. URL: https://scholar.google.ru/scholar?hl=ru&as_sdt=0%2C5&q=%28микрoпластик+OR+нанопластик%29+AND+русский&btnG=.
69. Казмирук В. Д. Микропластик в окружающей среде: нарастающая проблема планетарного масштаба. М.: ЛЕНАНД, 2020. 432 с.
70. Чубаренко И. П., Есюкова Е. Е., Хатмуллина Л. И., Лобчук О. И., Исаченко И. А., Буканова Т. В. Микропластик в морской среде. М.: Научный мир, 2021. 520 с.
71. Первая Всероссийская конференция «Микропластик в науке о полимерах». Сборник тезисов. Великий Новгород, 19–21 октября 2023 г. URL: https://microplastics.ru/wp-content/uploads/2023/11/mikroplastik2023_sbornik-tezisov.pdf.
72. Московский семинар по аналитической химии. URL: http://геохи.рф/Newsdata/Объявление_семинар_январь_2024.pdf.
73. Сперанская О., Понизова О., Цитцер О., Гурский Я. Пластик и пластиковые отходы в России: ситуация, проблемы и рекомендации // Международная Сеть по Ликвидации Загрязнителей. 2021. 92 с. URL: https://ipen.org/sites/default/files/documents/ipen-russia-2021-epa_v1_4q-ru.pdf.
74. Нормативы утилизации отходов от использования товаров на 2024–2029 гг. Постановление Правительства Российской Федерации от 29 декабря 2023 г. № 2414. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_466690/b164a6795129e4f124cbf864e36c42abb50c98d9/.

References

1. Ebrahimi P., Abbasi S., Pashaei R., Bogusz A., Oleszczuk P. Investigating impact of physicochemical properties of microplastics on human health: A short bibliometric analysis and review. *Chemosphere*. 2022; 289: 133146.
2. Bakhshoodeh R., Santos R. M. Comparative bibliometric trends of microplastics and perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances: how these hot environmental remediation research topics developed over time. *RSC advances*. 2022; 12(8): 4973–4987.
3. Bird R., Yu X., Catanescu O., Gupta S., Diaz L. M. L., Georges G. Microplastics: research landscape, challenges, and remediation. *ChemRxiv*. 2022; Doi: 10.26434/chemrxiv-2022-xwv9h.
4. Mittal N., Tiwari N., Singh D., Tripathi P., Sharma S. Toxicological impacts of microplastics on human health: a bibliometric analysis. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Doi: 10.1007/s11356-023-30801-4.
5. Milman B. L., Zhurkovich I. K. Map of Analytics-2022: Miniaturized Instruments, COVID-19, Microplastics, Deep Eutectics. *Analitika*. 2023; 13(5): 360–365 (In Russian).
6. Dietary and inhalation exposure to nano- and microplastic particles and potential implications for human health. Geneva: World Health Organization, 2022. 139p. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240054608>
7. Nohara N. M. L., Ariza-Tarazona M. C., Triboni E. R., Nohara E. L., Villarreal-Chiu J. F., Cedillo-González E. I. Are you drowned in microplastic pollution? A brief insight on the current knowledge for early career researchers developing novel remediation strategies. *Science of the Total Environment*. 2024; 918: 170382.
8. Jin M., Liu J., Yu J., Zhou Q., Wu W., Fu L., Yin C., Fernandez C., Karimi-Maleh H. Current development and future challenges in microplastic detection techniques: A bibliometrics-based analysis and review. *Science Progress*. 2022; 105(4): 1–22.
9. Liu M., Liu J., Xiong F., Xu K., Pu Y., Huang J., Zhang J., Pu Y., Sun R., Cheng K. Research advances of microplastics and potential health risks of microplastics on terrestrial higher mammals: a bibliometric analysis and literature review. *Environmental Geochemistry and Health*. 2023; 45(6): 2803–2838.
10. Yu Q., Hu X., Yang B., Zhang G., Wang J., Ling W. Distribution, abundance and risks of microplastics in the environment. *Chemosphere*. 2020; 249: 126059.
11. Wu M., Jiang Y., Kwong R. W., Brar S. K., Zhong H., Ji R. How do humans recognize and face challenges of microplastic pollution in marine environments? A bibliometric analysis. *Environmental Pollution*. 2021; 280: 116959.
12. Wang Y., Zhang B., Zhang R., Wei Y., Wang Y., Zhu R. Microplastic Pollution Research Based on the VOS Viewer

- Software: Research Trends, Ecological Effects, and Testing Methods. *Atmosphere*. 2023; 14(5): 838.
13. Bhat M. A. Indoor microplastics: a comprehensive review and bibliometric analysis. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023; 30(58): 121269–121291.
14. Bao M., Xiang X., Huang J., Kong L., Wu J., Cheng S. Microplastics in the atmosphere and water bodies of coastal agglomerations: a mini-review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2023; 20(3): 2466.
15. O'Brien S., Rauert C., Ribeiro F., Okoffo E. D., Burrows S. D., O'Brien J. W., Wang X., Wright S. L., Thomas K. V. There's something in the air: a review of sources, prevalence and behaviour of microplastics in the atmosphere. *Science of the Total Environment*. 2023; 874: 162193.
16. Papadimitriu M., Allinson G. Microplastics in the Mediterranean marine environment: a combined bibliometric and systematic analysis to identify current trends and challenges. *Microplastics and Nanoplastics*. 2022; 2(1): 8.
17. Adeniji A. O., Okaiyeto K., Mohammed J. N., Mabaleha M., Tanor E. B., George M. J. A mixed method assessment of research productivity on microplastics in various compartments in the environment. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2023; 20(11): 12847–12874.
18. Bhat M. A., Eraslan F. N., Gaga E. O., Gedik K. Scientometric analysis of microplastics across the globe. In: *Microplastics in the ecosystem: air, water, soil, and food*. Wiley, 2023. PP. 3–13.
19. Masson D., Pedrot M., Davranche M., Cabello-Hurtado F., Ryzhenko N., El Amrani A. Are nanoplastics potentially toxic for plants and rhizobiota? Current knowledge and recommendations. *NanoImpact*. 2023; 31: 100473.
20. Wang J., Zhao X., Wu F., Niu L., Tang Z., Liang W., Zhao T., Fang M., Wang H., Wang X. Characterization, occurrence, environmental behaviors, and risks of nanoplastics in the aquatic environment: current status and future perspectives. *Fundamental Research*. 2021; 1(3): 317–328.
21. Ji Z., Huang Y., Feng Y., Johansen A., Xue J., Tremblay L. A., Li Z. Effects of pristine microplastics and nanoplastics on soil invertebrates: A systematic review and meta-analysis of available data. *Science of the Total Environment*. 2021; 788: 147784.
22. Yu Q., Chuang C. Y. A., Jiang Y., Zhong H., Cundy A., Kwong R. W., Min C., Zhu X., Ji R. Exploring environmental nanoplastics research: networks and evolutionary trends. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. 2023; 261(1): 12.
23. Kihara S., Köper I., Mata J. P., McGillivray D. J. Reviewing nanoplastic toxicology: It's an interface problem. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021; 288: 102337.
24. Giri S., Dimkpa C. O., Ratnasekera D., Mukherjee A. Impact of micro and nano plastics on phototrophic organisms in freshwater and terrestrial ecosystems: A review of exposure, internalization, toxicity mechanisms, and eco-corona-dependent mitigation. *Environmental and Experimental Botany*. 2024; 219: 105666.
25. Shi C., Liu Z., Yu B., Zhang Y., Yang H., Han Y., Wang B., Liu Z., Zhang H. Emergence of nanoplastics in the aquatic environment and possible impacts on aquatic organisms. *Science of the Total Environment*. 2023; 906: 167404.
26. Wang R., Yue S., Huang C., Jia L., Tibihenda C., Li Z., Yu J. Visual mapping of global nanoplastics research progresses and hotspots: a scientometric assessment analysis. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023; 30: 114739–114755.
27. Munien S., Adhikari P. L., Reyrcraft K., Mays T. J., Naidoo T., Pruitt M., Arena J., Serhsen. Application and Efficacy of Management Interventions for the Control of Microplastics in Freshwater Bodies: A Systematic Review. *Water*. 2024; 16(1): 176.
28. Li X., Chen Y., Zhang S., Dong Y., Pang Q., Lynch I., Xie C., Guo Z., Zhang P. From marine to freshwater environment: A review of the ecotoxicological effects of microplastics. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2023; 251: 114564.
29. Porcino N., Bottari T., Mancuso M. Is wild marine biota affected by microplastics? *Animals*. 2022; 13(1): 147.
30. Renzi M., Pauna V. H., Provenza F., Munari C., Mistri M. Marine litter in transitional water ecosystems: state of the art review based on a bibliometric analysis. *Water*. 2020; 12(2): 612.
31. Ahmed A. S., Billah M. M., Ali M. M., Bhuiyan M. K. A., Guo L., Mohinuzzaman M., Hossain M. B., Rahman M. S., Islam M. S., Yan M., Cai W. Microplastics in aquatic environments: A comprehensive review of toxicity, removal, and remediation strategies. *Science of the Total Environment*. 2023; 876: 162414.
32. Lou X., Sui Y., Fang C., Tang Y., Huang D., Guo Y. Bibliometric analysis for global marine microplastic pollution control from 2013 to 2022. *Frontiers in Environmental Science*. 2023; 11: 1215317.
33. Sridhar A., Kannan D., Kapoor A., Prabhakar S. Extraction and detection methods of microplastics in food and marine systems: a critical review. *Chemosphere*. 2022; 286: 131653.
34. Pan T., Liao H., Yang F., Sun F., Guo Y., Yang H., Feng D., Zhou X., Wang Q. Review of microplastics in lakes: sources, distribution characteristics, and environmental effects. *Carbon Research*. 2023; 2(1): 25.
35. Leal Filho W., Dedeoglu C., Dinis M. A. P., Salvia A. L., Barbir J., Voronova V., Abubakar I. R., Iital A., Pachel K., Huthoff F., Sharifi A., Yang P. J., Klavins M., Emanche V. O. Riverine plastic pollution in Asia: results from a bibliometric assessment. *Land*. 2022; 11(7): 1117.
36. Palmas S., Vacca A., Mais L. Bibliometric analysis on the papers dedicated to microplastics in wastewater treatments. *Catalysts*. 2021; 11(8): 913.
37. Kang P., Ji B., Zhao Y., Wei T. How can we trace microplastics in wastewater treatment plants: A review of the current knowledge on their analysis approaches. *Science of the Total Environment*. 2020; 745: 140943.
38. Guo S., Wang Q., Li Z., Chen Y., Li H., Zhang J., Wang X., Liu J., Cao B., Zou G., Zhang B., Zhao M. Ecological risk of microplastic toxicity to earthworms in soil: A bibliometric analysis. *Frontiers in Environmental Science*. 2023; 11: 1126847.
39. Sun Y., Yang C., Liang H., Zhang S., Zhang R., Dong Y., Tanveer S. K., Hai J. Health risk analysis of microplastics in soil in the 21st century: A scientometrics review. *Frontiers in Environmental Science*. 2022; 10: 976237.
40. He D., Zhang Y., Gao W. Micro (nano) plastic contaminations from soils to plants: human food risks. *Current Opinion in Food Science*. 2021; 41: 116–121.
41. Liu H., Cui L., Li T., Schillaci C., Song X., Pastorino P., Zou H., Cui X., Xu Z., Fantke P. Micro- and nanoplastics in soils: Tracing research progression from comprehensive analysis to ecotoxicological effects. *Ecological Indicators*. 2023; 156: 111109.
42. Ya-di Z., Tian-jie S., Yan-hua W., Rui-yuan W. Review and future trends of soil microplastics research: visual analysis based on Citespace. *Environmental Sciences Europe*. 2022; 34(1): 122.
43. Yang T., Liu J., Zhu H., Zhu L., Kong T., Tai S. The Bibliometric Analysis of Microplastics in Soil Environments: Hotspots of Research and Trends of Development. *Sustainability*. 2023; 15(9): 7122.
44. Gautam K., Sadasivam A. Recent trends in analytical measures of microplastic in soil and toxicopathological risk assessment in earthworms. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2023; 168: 117292.
45. Can-Güven E. Microplastics as emerging atmospheric pollutants: a review and bibliometric analysis. *Air Quality, Atmosphere and Health*. 2021; 14(2): 203–215.
46. Mehta N., Kozielska B. A systematic literature review and bibliometric analysis of sources and analytical approaches of indoor microplastics. *Emerging Contaminants*. 2023; 10: 100274.
47. Martín-Gómez B., Elmore J. S., Valverde S., Ares A. M., Bernal J. Recent applications of chromatography for determining microplastics and related compounds (bisphenols and phthalate esters) in food. *Microchemical Journal*. 2024; 197: 109903.
48. Sewwandi M., Wijesekara H., Rajapaksha A. U., Soysa S., Vithanage M. Microplastics and plastics-associated contaminants in food and beverages: Global trends, concentrations, and human exposure. *Environmental Pollution*. 2023. 317: 120747.
49. Sun Q., Ren S. Y., Ni H. G. Incidence of microplastics in personal care products: an appreciable part of plastic pollution. *Science of the Total Environment*. 2020; 742: 140218.

50. Yu Y., Craig N., Su L. A Hidden Pathway for Human Exposure to Micro-and Nanoplastics – The Mechanical Fragmentation of Plastic Products during Daily Use. *Toxics*. 2023; 11(9): 774.
51. De la Torre Bayo J. J., Martín-Lara M. Á., Calero Hoces M., Sánchez Castillo P. M., Pula H. J., Zamorano M. Management of used Covid-19 personal protective equipment: a bibliometric analysis and literature review. *Applied Sciences*. 2023; 13(4): 2377.
52. Huang S., Wang H., Ahmad W., Ahmad A., Vatin N. I., Mohamed A. M., Deifalla A. F., Mehmood I. Plastic waste management strategies and their environmental aspects: A scientometric analysis and comprehensive review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022; 19(8): 4556.
53. Tsuchimoto I., Kajikawa Y. Recycling of plastic waste: a systematic review using bibliometric analysis. *Sustainability*. 2022; 14(24): 16340.
54. Akinpelu E. A., Nchu F. A bibliometric analysis of research trends in biodegradation of plastics. *Polymers*. 2022; 14(13): 2642.
55. Lastovina T. A., Budnyk A. P. A review of methods for extraction, removal, and stimulated degradation of microplastics. *Journal of Water Process Engineering*. 2021; 43: 102209.
56. Verastegui C., Gilvonio N., Flores M. A bibliometrics study of plants, animals, bacteria, algae and technologies that reduce, filter and eliminate microplastics from planet earth, ecological solutions for the environment. *Decision Science Letters*. 2023; 12(4): 773–782.
57. Liu S., Shi J., Wang J., Dai Y., Li H., Li J., Liu X., Chen X., Wang Z., Zhang P. Interactions between microplastics and heavy metals in aquatic environments: a review. *Frontiers in Microbiology*. 2021; 12: 652520.
58. De Souza A. M., Santos A. L., Araújo D. S., De Barros Magalhães R. R., Rocha T. L. Micro (nano) plastics as a vector of pharmaceuticals in aquatic ecosystem: Historical review and future trends. *Journal of Hazardous Materials Advances*. 2022; 6: 100068.
59. Li K., Wang F. Global hotspots and trends in interactions of microplastics and heavy metals: a bibliometric analysis and literature review. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023; 30(41): 93309–93322.
60. Galafassi S., Campanale C., Massarelli C., Uricchio V. F., Volta P. Do freshwater fish eat microplastics? A review with a focus on effects on fish health and predictive traits of MPs ingestion. *Water*. 2021; 13(16): 2214.
61. Geremia E., Muscari Tomajoli M. T., Murano C., Petito A., Fasciolo G. The impact of micro-and nanoplastics on aquatic organisms: Mechanisms of oxidative stress and implications for human health – A review. *Environments*. 2023; 10(9): 161.
62. Zhao W., Chen Y., Hu N., Long D., Cao Y. The uses of zebrafish (Danio rerio) as an in vivo model for toxicological studies: A review based on bibliometrics. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2024; 272: 116023.
63. Da Costa Araújo A. P., Rocha T. L., De Melo e Silva D., Malafaia G. Micro (nano) plastics as an emerging risk factor to the health of amphibian: A scientometric and systematic review. *Chemosphere*. 2021; 283: 131090.
64. Jiang Y., Xia W., Zhao R., Wang M., Tang J., Wei Y. Insight into the interaction between microplastics and microorganisms based on a bibliometric and visualized analysis. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 2021; 107: 585–596.
65. Mittal N., Tiwari N., Singh D., Tripathi P., Sharma S. A Bibliometric Analysis of Toxicological Impacts of Microplastics in the Environment. *Research Square*, 24 Mar 2023. URL: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2637831/v1>
66. Wang Q., Huang R., Li R. Impact of the COVID-19 pandemic on research on marine plastic pollution—A bibliometric-based assessment. *Marine Policy*. 2022; 146: 105285.
67. Li K., Du L., Qin C., Bolan N., Wang H., Wang H. Microplastic pollution as an environmental risk exacerbating the greenhouse effect and climate change: a review. *Carbon Research*. 2024; 3(1): 9.
68. Articles on MP and NP in Russian. URL: https://scholar.google.ru/scholar?hl=ru&as_sdt=0%2C5&q=%28микропластик+OR+нанопластик%29+AND+русский&btnG=
69. Kazmiruk V. D. *Microplastics in the environment: a growing problem of planetary scale*. M.: LENAND, 2020. 432 c. (In Russian).
70. Chubarenko I. P., Yesyukova E. E., Khatmullina L. I., Lobchuk O. I., Isachenko I. A., Bukanova T. V. *Microplastics in the marine environment*. M.: Nauchnyj mir publ., 2021. 520 c. (In Russian).
71. First All-Russian Conference Microplastics in Polymer Science. Collection of abstracts. Velikiy Novgorod, October 19–21, 2023. URL: https://microplastics.ru/wp-content/uploads/2023/11/mikroplastik2023_sbornik-tezisev.pdf. (In Russian).
72. Moscow Seminar on Analytical Chemistry. URL: http://geoхи.рф/Newsdata/Объявление_семинар_январь_2024.pdf. (In Russian).
73. Speranskaya O., Ponizova O., Zitzer O., Gursky Ya. Plastic and Plastic Waste in Russia: Situation, Problems and Recommendations // International Pollutants Elimination Network. 2021. 92 c. URL: https://ipen.org/sites/default/files/documents/ipen-russia-2021-epa_v1_4q-ru.pdf. (In Russian).
74. Norms of waste utilization from the use of goods for 2024–2029. Resolution of the Government of the Russian Federation of December 29, 2023 N 2414. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_466690/b164a6795129e4f124cbf864e36c42abb50c98d9. (In Russian).

Авторы / Authors

Мильман Борис Львович, доктор химических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения «Научно-клинический центр токсикологии имени академика С. Н. Голикова Федерального медико-биологического агентства» (ФГБУ НКЦТ им. С. Н. Голикова ФМБА России), Санкт-Петербург, РФ. Области научных интересов: масс-спектрометрия, аналитическая и органическая химия, науковедение.
Milman Boris L'vovich, Doctor of Chemical Sciences, Leading Researcher, Federal State Budgetary Institution Academician S. N. Golikov Scientific and Clinical Center of Toxicology of the Federal Medical and Biological Agency (FGBU S. N. Golikov Scientific and Clinical Center of Toxicology of the Federal Medical and Biological Agency), St. Petersburg, Russia. Research interests: mass spectrometry, analytical and organic chemistry, science of science.
E-mail: bormilman@yandex.ru
ORCID 0000-0002-0609-6117

Журкович Инна Константиновна, кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник и и. о. заведующего лабораторией Федерального государственного бюджетного учреждения «Научно-клинический центр токсикологии имени академика С. Н. Голикова Федерального медико-биологического агентства» (ФГБУ НКЦТ им. С. Н. Голикова ФМБА России), Санкт-Петербург, РФ. Области научных интересов: токсикологическая химия, жидкостная хроматография, фармакокинетика.
Zhurkovich Inna Konstantinovna, Candidate of Chemical Sciences, Leading Researcher and Acting Head of Laboratory, Federal State Budgetary Institution Academician S. N. Golikov Scientific and Clinical Center of Toxicology of the Federal Medical and Biological Agency (FGBU S. N. Golikov Scientific and Clinical Center of Toxicology of the Federal Medical and Biological Agency of Russia), St. Petersburg, Russia. Research interests: toxicological chemistry, liquid chromatography, pharmacokinetics.
ORCID 0000-0002-9885-6055

Конфликт интересов / Conflict of Interest

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 14.07.2024
Принята к публикации 26.08.2024