

МИКРОПЛАСТИК В ВОДНОЙ СРЕДЕ И ВОДНЫХ БИОЛОГИЧЕСКИХ РЕСУРСАХ

© 2026 г. В.А. Беляев¹ (spin: 7717-0509), А.А. Лукин^{2,3}, (spin: 2692-9210),
И.В. Седлецкий¹ (spin: 6788-5926)

1 – ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО», Россия, Москва, 105187

2 – ФГБОУ ВО Южно-Уральский государственный аграрный университет,
Россия, Челябинск, 454080

3 – ФГАОУ ВО Южно-Уральский государственный университет (Национальный
Исследовательский Университет), Россия, Челябинск, 454080
E.mail: sedletskiy@vniro.ru

Поступила в редакцию 2026 г.

Обзор посвящен изучению загрязнения морской среды микропластиком и его негативному воздействию на рыбные ресурсы, продовольственную безопасность и здоровье человека. Приводятся многочисленные исследования, демонстрирующие присутствие микропластика в морских экосистемах и его влияние на различные виды морских организмов, включая рыбу. Описываются пути проникновения микропластика в пищевые цепи и рассматриваются возможные последствия для здоровья человека. Подчеркивается важность продолжения исследований и разработки комплексных мер для уменьшения негативного воздействия микропластика на морские экосистемы и здоровье человека.

Ключевые слова: загрязнение морской среды, микропластик, рыбные ресурсы, продовольственная безопасность, здоровье человека, биологическое накопление

Пластиковое загрязнение перерастает в острую экологическую проблему планетарного масштаба, оказывающую пагубное влияние на живую природу, экологические системы и самочувствие людей. В настоящем аналитическом обзоре представлен всесторонний анализ широко распространенной проблемы загрязнения микрочастицами пластика, основанный на обширной базе исследовательских данных (Беляев и др., 2024б). Благодаря массовому применению и ненадлежащей утилизации, пластик, обусловленный своей неспособностью к биоразложению, обнаруживается как в наземных, так и в морских экосистемах.

Микрочастицы пластика, определяемые как пластиковые фрагменты размером менее 5 мм, проникают в экологические системы по всему миру, включая реки, озера, океаны и городские территории. Микропластик, попадающий в морскую среду, стал объектом многочисленных исследований (Polidoro et al.,

2022; Song et al., 2022; Беляев и др. 2024 а). Но, на наш взгляд, некоторым вопросам его присутствия в пресноводных экосистемах и воздухе жилых и производственных помещений не уделялось должного внимания.

Недавние исследования, проведенные на пляжах Бангладеш и в Таиланде (Kasamesiri et al., 2023), выявили негативное воздействие загрязнения микрочастицами пластика на экосистемы и здоровье населения. Микропластик способен проникать через желудочно-кишечный тракт человека в лимфатическую систему, что может вызывать проблемы со здоровьем. В статье подчеркивается, что микропластики размером менее 150 мкм особенно опасны, так как могут перемещаться по организму человека.

Поглощение микропластика морскими обитателями, включая рыб и моллюсков, вызвало опасения по поводу биоаккумуляции и ее последствий для потребителей (рис. 1) (Luqman et al., 2021).

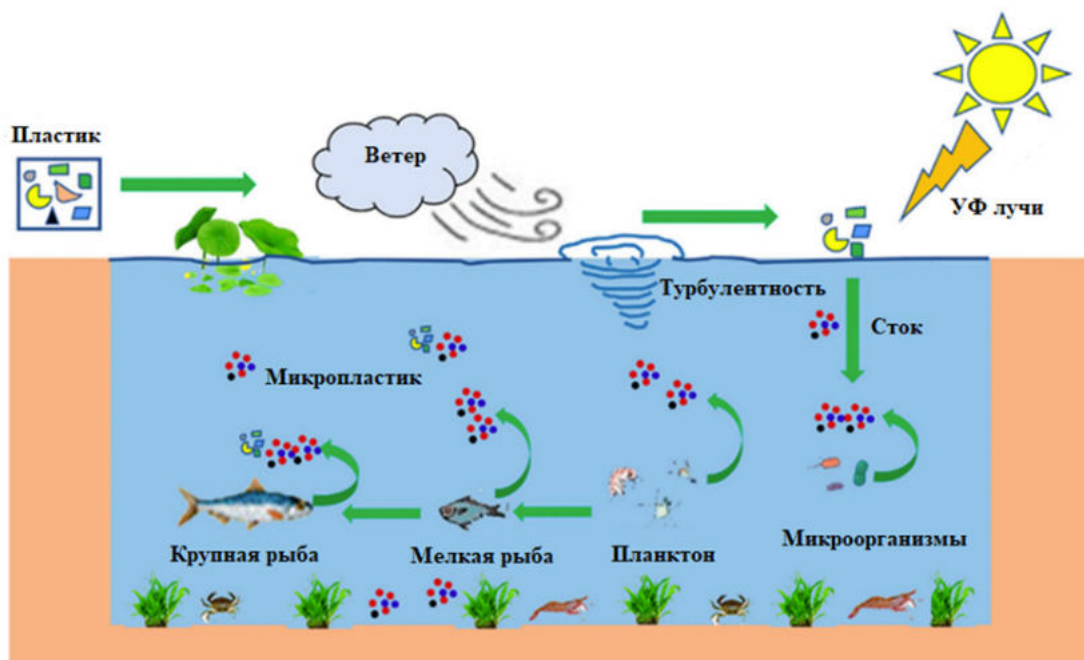


Рис. 1. Процесс образования микрочастиц микропластика в водных объектах (по Luqman et al., 2021).

Кроме того, исследования, проведенные в Испании, выявили сложную динамику распространения микропластика в окружающей среде и подчеркнули роль очистных сооружений в загрязнении микропластиком (Bayo et al., 2023). Для решения этой проблемы могут быть использованы физико-химические методы как в качестве предварительной, так и последующей обработки. Китайские ученые продемонстрировали динамичный характер этого процесса, показывая сезонные колебания концентрации микропластика в различных средах. Исследование показало существенные сезонные различия в пространственном размещении пластиковых отходов на береговых линиях и определило ключевую роль приливных процессов и антропогенного фактора в формировании реестра пластикового загрязнения морской среды. Концентрация пластикового мусора в летний период (среднее значение: $6,00 \pm 2,10$ единиц/м²) значительно превышала зимние показатели (среднее значение: $3,75 \pm 2,12$ единиц/м²; $p < 0,05$), что вероятно обусловлено повышенной интенсивностью человеческой деятельности в теплое время года (Zhang et al., 2022).

Более того, Г. Сунь с соавторами (Song et al., 2022) отметили, что пандемия COVID-19 не преднамеренно открыла уникальную возможность изучить взаимосвязь между снижением активности человеческой деятельности и загрязнением микропластиком.

Так в Бангладеше провели исследование, которое проливает свет на влияние мер изоляции на содержание микропластика в уличной пыли и на качество воздуха, предоставляя информацию об экологических последствиях ограничений, связанных с пандемиями (Rabin et al., 2023).

Разработка мер и стратегий по смягчению последствий загрязнения микропластиком среды имеет жизненно важное значение, поскольку ситуация с каждым годом усугубляется.

Цель настоящего исследования состоит в том, чтобы провести литературный обзор проблем, связанных с загрязнением микропластиком водной среды. Задача состоит в том, чтобы заложить основу для последующих исследований, способствовать принятию обоснованных решений и стимулировать глобальные усилия, направленные на

смягчение повсеместной и давней проблемы загрязнения микропластиком.

Проблема утилизации твердых отходов представляет собой серьезную экологическую и санитарную проблему в глобальном масштабе, т.к. в результате индустриальной и сельскохозяйственной деятельности человека в окружающую среду поступает огромное количество разнообразных материалов (Kole et al., 2017; Sobhani et al., 2020; Bashir et al., 2021). Термин «твердые отходы» охватывает разнообразные материалы, которые могут существовать в твердом, жидком, полутвердом или газообразном состояниях. Утилизация муниципальных твердых отходов (МТБО) представляет собой многогранную и сложную проблему, включающую в себя несколько типов отходов, в том числе бытовых, коммерческих, институциональных, отходов от уборки улиц, строительные и санитарные отходы.

Широкое применение пластиковых материалов в нашей повседневной жизни принесло неоспоримые социальные выгоды, начиная с улучшения здоровья и заканчивая повышением комфортности в повседневной жизни. Тем не менее, резкое увеличение производства и потребления пластика привело к опасности загрязнения микрочастицами пластика. Эти крошечные пластиковые частицы, проникли в экосистемы по всему миру, от морских глубин до воздуха, которым мы дышим, и не оставили незатронутым ни один квадратный метр на нашей планете (рис. 2) (Zhai et al., 2023).

Массовое использование и долговечность пластмасс в современной цивилизации привели к непредвиденным последствиям, в частности, к распаду крупных пластиковых изделий на мелкие частицы, которые составляют микропластик. В результате эти микроскопические частицы пластика попадают в экосистемы, загрязняя атмосферу, воду, почву и пищевые продукты.

Согласно исследованию К.М. Бёргера и соавторов (Boerger et al., 2010), в пищеварительном тракте приблизительно трети рыб,

отловленных в центральной части Тихого океана, были идентифицированы пластмассовые фрагменты сантиметрового размера, со средней концентрацией 2,1 частицы на особь. Авторы данной статьи также приступили к исследованию важного промыслового вида Каспийского моря – долгинской сельди (*Alosa braschnikowi*) на присутствие микропластика и других посторонних частиц на примере особей, отловленных в естественных условиях Северного Каспия (Седлецкий и др., 2025a). Предварительные данные выявили значительное загрязнение как микропластиком, так и другими частицами различного происхождения. В частности, на каждую особь было обнаружено множество неидентифицированных инородных частиц, включая микропластик, мезопластик размером от 5 до 50 мм и макропластик более 50 мм.

При анализе пелагических и донных видов рыб из акватории Ла-Манша микропластик были зафиксированы в желудочно-кишечном тракте у трети исследованных образцов. В ходе исследования было обследовано 504 экз. рыб. Пластиковые частицы обнаружены в пищеварительном тракте у 36,5% изученных особей. Присутствие пластика было отмечено во всех десяти рассматриваемых видах, включая пять пелагических и пять донных. Из 184 штук рыб, содержащих пластик, среднее количество частиц на одну особь составило $1,90 \pm 0,10$. Метод инфракрасной Фурье-спектроскопии позволил идентифицировать 351 пластиковый фрагмент. Наиболее распространенными материалами оказались полиамид (35,6%) и полусинтетическая целлюлоза – вискоза (57,8%). Существенных различий в объеме потребленного пластика между пелагическими и донными рыбами не установлено (Lusher et al., 2013).

Изучение содержимого желудков ряда промысловых видов у побережья Португалии выявило присутствие в среднем $1,40 \pm 0,66$ частиц на особь ($n = 52$), диаметр которых находился в интервале от 220 до 4800 микрометров. Среди 535 рыб, собранных в пресно-

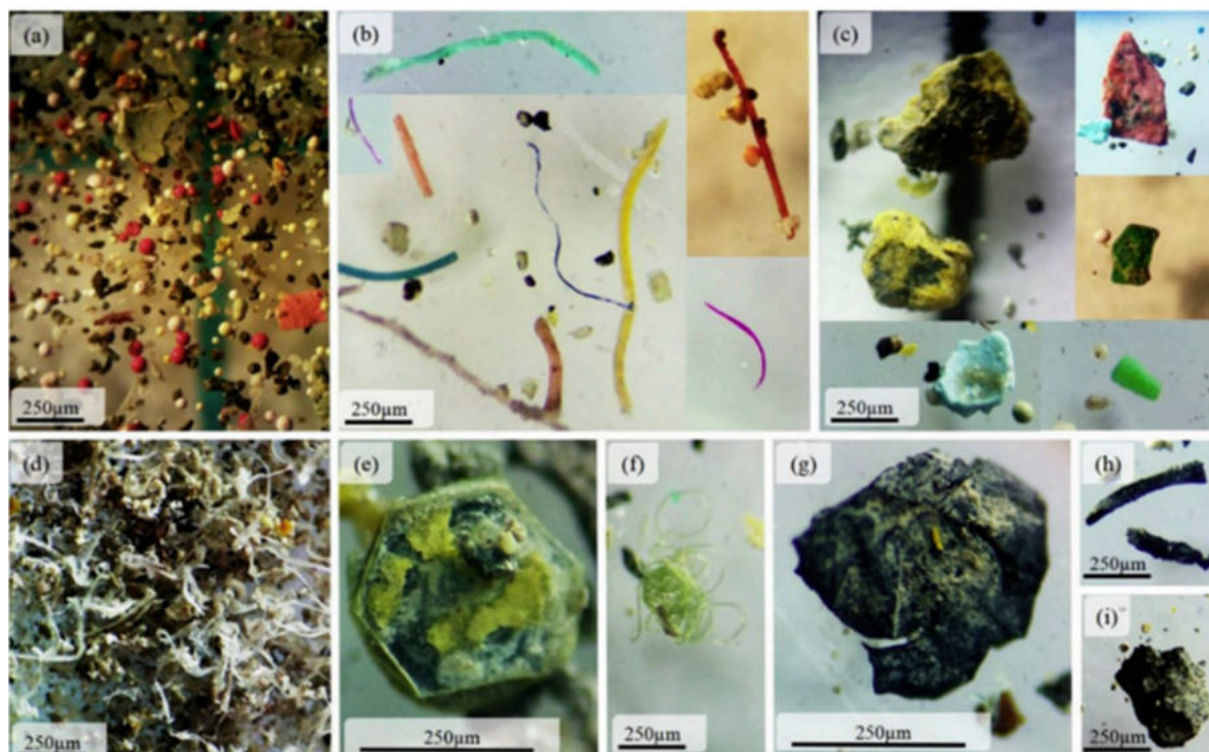


Рис. 2. Изображения микропластика, полученные с помощью микроскопа: (а) сферические микро-частицы, (б) волокнистые микрочастицы, (с) фрагментированные микрочастицы, (д) мембранные микрочастицы, (е) одиночные гексагональные мембранные микрочастицы, (ф) линейные микро-частицы, (г) мембранный МР, (h) волокнистый и (i) фрагментированный МР (по Bostan et al., 2023).

водных водотоках и эстуарной зоне Мексиканского залива, частицы микропластика в пищеварительном тракте содержали 8% пресноводных и 10% морских особей (Phillips, Bonner, 2015). Частота встречаемости проглоченного рыбой микропластика в ненарушенных антропогенным воздействием ручьях (5%) была ниже, чем в урбанизированном водотоке (29%). Распределение микропластика между различными местообитаниями (бенталь, пелагиаль) и трофическими гильдиями оказалось статистически однородным.

Распространенность пластикового мусора антропогенного происхождения в желудочно-кишечном тракте рыб (*Oreochromis niloticus*, *Katsuwonus pelamis*, *Rastrelliger kanagurta*, *Decapterus macrosoma*, *Spratelloides gracilis*, *Siganus argenteus*, *Siganus fuscescens*, *Siganus canaliculatus*, *Lutjanus gibbus*, *Selar boops*), отобранных для анализа на рынках Индонезии и Калифорнии (США), была оце-

нена в работе Рочмен с соавторами (Rochman et al., 2015). В образцах из Индонезии микропластик был обнаружен у 28% отдельных особей и у 55% из 11 исследованных видов, со средним значением 5,03 частицы на рыбу. Аналогично, в образцах из США микропластик присутствовал у 25% особей (2,03 частицы/рыбу) и у 67% из 12-ти изученных видов. Частицы, извлеченные из индонезийской рыбы, были классифицированы как фрагменты и пленки, тогда как в американских образцах доминировали волокна.

Исследование К. Рюммеля и коллег, посвященное обнаружению полимеров, включая микропластик, у пелагических (сельдь, скумбрия) и донных рыб (треска, камбала, речная камбала) из Северного и Балтийского морей, показало, что пластиковые частицы содержались у 5,5% обследованных особей (Rummel et al., 2016). При этом 74% всех извлеченных частиц соответствовали раз-



Рис. 3. Креветка вида *Crangon crangon* (Devriese et al., 2015).

мерному классу микропластика (менее 5 мм), с количеством от 1 до 7 частиц на рыбу, и почти 40% частиц состояли из полиэтилена. Инцидентность проглатывания пластика была достоверно выше у пелагических видов по сравнению с придонными (10,7% против 3,4%). Однако остается невыясненным, было ли потребление микропластика рыбами в рассмотренных исследованиях прямым или являлось следствием трофического переноса (Rummel et al., 2016).

Синтетические волокна размером от 200 до 1000 микрометров были идентифицированы у креветок вида *Crangon crangon* (рис. 3), выловленных в различных районах Ла-Манша. Волокна присутствовали в 63% проанализированных образцов, со средним содержанием $0,68 \pm 0,55$ частиц микропластика на грамм мышечной ткани, что эквивалентно 1,23–0,99 частицы на одну креветку (Devriese et al., 2015). Авторы отметили сезонную динамику, зафиксировав более высокие концентрации микропластика в октябре по сравнению с мартом.

Исследование мягких тканей диких и культивируемых моллюсков мидий (*Mytilus edulis*, *Mytilus galloprovincialis*), а также их гибридной формы), отобранных на бельгийс-

ком побережье (три волнолома и три участка набережной) и в трех бельгийских супермаркетах, выявило присутствие микроскопических синтетических волокон длиной от 200 до 1500 микрометров (De Witte et al., 2014). Спектр обнаруженных цветов включал черный, красный, синий, пурпурный, полупрозрачный, прозрачный, оранжевый, зеленый и желтый, причем наиболее часто встречался размерный класс 1000–1500 мкм. Общая концентрация микропластика колебалась в пределах 0,26–0,51 волокна на грамм мышечной ткани. Повышенная встречаемость оранжевых волокон в образцах с причалов коррелировала с активностью рыболовства.

В другом исследовании в мидиях (*M. edulis*), выращенных в Северном море, и в тихоокеанских устрицах (*Crassostrea gigas*), культивируемых в Атлантическом океане, было установлено среднее содержание загрязнителей на уровне 0,36 и 0,47 частиц на грамм соответственно (Van Cauwenberghe et al., 2015). После трехдневного процесса очистки (депурации) количество микропластика снизилось до 0,24 и 0,35 частиц на грамм у мидий и устриц, соответственно. В очищенных мидиях преобладали частицы размером 5–10 мкм (50%), тогда как в устрицах наиболее

распространенными были фракции 11–15 мкм (30%) и 16–20 мкм (33%).

В процессе очистки пищеварительного тракта мидий и устриц наблюдается преобладание частиц микропластика крупных размеров. Это явление обусловлено следующими причинами:

- крупные фрагменты с большей вероятностью задерживаются в пищеварительной системе и эффективно элиминируются из организма моллюсков в процессе депурации.

- мелкие частицы, обладая способностью к пенетрации в более глубокие слои тканей, могут оставаться в организме значительно дольше.

- большинство исследовательских методик сосредоточено на анализе содержимого желудочно-кишечного тракта, где макрочастицы визуальнo и аналитически определяются проще.

Более высокие концентрации микропластика, в диапазоне 2,1–10,5 частиц на грамм, были зафиксированы в тканях девяти видов промысловых двустворчатых моллюсков, приобретенных на рынках Китая (Li et al., 2015). Размер частиц варьировался от 5 до 5000 мкм, при этом около 60% всех частиц находились в интервале 5–250 мкм. Во всех исследованных образцах присутствовали различные типы микропластика: волокна, фрагменты и гранулы. Волокнистые частицы являлись наибо-

лее распространенной формой и в большинстве случаев составляли свыше половины от общего числа.

Мидии (*M. edulis*) (рис. 4), собранные в шести локациях вдоль франко-бельгийско-голландского побережья, после 24-часовой депурации для полного очищения кишечника содержали в среднем 0,2–0,3 частицы на грамм (размерный диапазон 20–90 мкм), с максимальным значением 1,1 частицы на грамм (Van Cauwenberghe et al., 2015).

Микрочастицы пластика представляют собой важный переносчик загрязняющих веществ (фталаты, бисфенолы, антипирены, свинец, кадмий, хром, медь, бактерии, грибки, простейшие, пестициды, антибиотики, парабены) из-за их небольшого размера и способности адсорбировать опасные вещества, что усугубляет их воздействие как на окружающую среду, так и на здоровье человека. Кроме того, питьевая вода в развивающихся странах сильно загрязнена микрочастицами пластика и другими загрязняющими веществами. Поэтому использование бытовых технологий очистки воды имеет решающее значение для защиты здоровья людей (Niloy, Chowdhury, 2017).

Исследователи применяют оценку риска для изучения воздействия микропластика на экосистемы и здоровье человека (Беляев и др., 2024 а). Оценка потенциальных проблем для здоровья, связанных с воздействием микропластика на организм, упрощается путем расчета коэффициентов опасности на основе концентрации микропластика в исследуемых образцах. Важными аспектами этих подходов являются сезонные колебания и временная динамика. Исследования, проводимые в разные сезоны, позволяют понять, как деятельность человека и климатические условия влияют на распространение микропластика (Седлецкий и др., 2025б). Изучение изменений в распределении типов микропластика в различные периоды внешних воздействий, таких как карантинные меры, связанные с COVID-19 (Song et al., 2022), позволило углубить наше



Рис. 4. Мидия *Mytilus edulis*.

Таблица 1. Общие методы сбора и анализа образцов

Образец	Анализ	Ссылка
Проведение отбора проб микропластика в прибрежных зонах морской среды, расположенных в Американском Самоа	Методы микроскопии и спектроскопии	(Polidoro et al., 2022)
Сбор использованных защитных масок для лица в нескольких береговых зонах Китая в период распространения COVID-19	Стереомикроскоп и ИК-спектроскопия	(Song et al., 2022)
Сбор проб с береговой линии Пхукета, в том числе взятие проб морских отложений и двусторчатых моллюсков	Микроскопический анализ, LDIR, микро-FTIR и Рамановская микроскопия	(Akkajit et al., 2023)
Забор проб воздуха внутри зданий, расположенных рядом с комплексами для очистки канализационных вод	Методы микроскопии (размер, форма, цвет)	(Bayo et al., 2023)
Регулярный мониторинг и сбор образцов пластиковых отходов, выбрасываемых на берег в прибрежной зоне парка Юган	Анализ сезонных изменений, количественный анализ	(Zhang et al., 2022)
Отбор проб воды с поверхности (глубина 0–30 см) и образцов донных осадков из водоема Уболратана	Извлечение микропластика, его характеристика, оценка рисков	(Kasamesiri et al., 2023)

понимание взаимосвязи между факторами окружающей среды и загрязнением микропластиком. В таблице 1 приведены методы, применяемые для сбора и анализа образцов со ссылками на источники.

Обобщение результатов, проанализированных выше исследований предоставляет важную информацию о загрязнении микропластиком в различных экосистемах и регионах мира. В совокупности эти важные выводы формируют наше представление о сложном феномене загрязнения микропластиком.

Сезонные различия. Исследования показывают, что могут наблюдаться существенные сезонные колебания концентрации микропластика – в летние месяцы концентрация микропластика увеличивается, по-видимому, в связи с большей активностью человека и погодными факторами (сочетание высокой температуры, солнечной радиации, влажности, увеличения стока и экстремальных погодных явлений летом приводит к заметному росту концен-

трации микропластика в окружающей среде) (Kasamesiri et al., 2023).

Изобилие и состав. Количество и состав микропластика меняется в зависимости от экологической обстановки. Он регулярно обнаруживается в пробах воды, а также в морских и прибрежных отложениях. Микропластик может принимать различные формы, наиболее распространенными из которых являются волокна, фрагменты, пленки и сферы. Среди популяции часто идентифицируют белый, цветной и прозрачный микропластик на основе его цвета (Luqman et al., 2021).

Размер. Микропластик представляет собой мельчайшие частицы размером до 5 мм, однако по ряду классификаций к этой категории могут относиться и более крупные пластиковые фрагменты длиной 2,5 см и более. Окружающая среда наполнена как крупным пластиковым мусором, так и микропластиком. Разнообразие размеров влияет на их под-

вижность, способность к поглощению животными и возможное проникновение в пищевую цепь (Rabin et al., 2023).

Источники. Проанализированные публикации в совокупности демонстрируют, что существует множество путей и источников загрязнения микропластиком. В качестве распространенных источников можно привести примеры сточных вод, промышленных выбросов и пластикового мусора. Согласно данным Т. Дейвида с соавторами, микропластик может попадать в экосистемы через реки, переносимые по воздуху отложения и прямое загрязнение окружающей среды (David et al., 2023).

Очистные сооружения как источники и поглотители сточных вод. По данным Дж. Байо с коллегами (Bayo et al., 2023), станции очистки сточных вод являются основными источниками загрязнения микропластиком. Эти предприятия могут функционировать и как резервуары, накапливая микропластик из бытовых и промышленных сточных вод, и как источники, выбрасывающие микропластик в окружающую среду со стоками. Эффективность очистных сооружений в удалении микропластика варьируется, что подчеркивает необходимость совершенствования методов очистки.

Риски для здоровья и экологии: Проанализированные публикации в совокупности подчеркивают потенциальную опасность загрязнения микропластиком для здоровья человека и окружающей среды. Многие виды животных могут потреблять микропластик, что может приводить к физическим повреждениям, а также к накоплению химических токсинов. Потребление морепродуктов, содержащих микропластик, может негативно сказываться на морской флоре и фауне и, следовательно, на здоровье человека (Polidoro et al., 2022). Микроскопические частицы пластика способны провоцировать физические травмы у обитателей морской среды, поскольку не усваиваются и откладываются в их органах и тканевых структурах. Следствием этого становится ухудшение трофического обеспечения,

сбои в процессах размножения и угнетение защитных функций организма. Пластиковые отходы могут ограничивать проникновение солнечного света к водорослям и иным морским растениям, что способно вызвать их отмирание и последующую деградацию экосистемы (Neves et al., 2015). Кроме того, микропластик выступает в роли транспортера опасных химических соединений, которые обладают свойством аккумулироваться в телах морских животных, провоцируя интоксикацию и тяжелые патологические состояния.

Употребление в пищу морепродуктов, загрязненных микрочастицами пластика, способно вызывать ряд негативных последствий для здоровья, среди которых выделяются воспалительные реакции, окислительный стресс и повышение вероятности возникновения хронических болезней (Espinosa et al., 2017; Herrera, 2022).

Результаты проведенных изысканий позволили существенно расширить наше понимание проблемы загрязнения окружающей среды микропластиком, а также его воздействия на здоровье людей и экологические системы. Данный комплекс исследований вносит существенный вклад в развитие соответствующей научной области.

Глобальное распространение: проанализированные литературные источники свидетельствуют о повсеместном распространении микропластиковых частиц по всему миру. Они акцентируют внимание на необходимости повышения уровня осведомленности общественности, научного сообщества и лиц, принимающих политические решения, о вездесущности микропластика в различных природных средах и о важности согласованных действий, в направлении практических решений глобального вопроса цивилизации XXI в.

COVID-19 и проблема микропластика (Song et al., 2022). Указанное исследование демонстрирует существенный вклад одноразовых масок в общую проблему загрязнения

микропластиком в мировом масштабе. Оно подчеркивает необходимость ответственного подхода к утилизации отходов, возникших в период пандемии, а также значимость понимания влияния мер общественного здравоохранения на окружающую среду.

Влияние прибрежного туризма Результаты этой работы указывают на значительное влияние туристической деятельности на накопление пластикового мусора на удаленных прибрежных территориях. Это подтверждает необходимость экологически ответственного туризма и помогает глубже понять взаимосвязь между туризмом и состоянием планеты (Zhang et al., 2022).

Модели оценки риска микропластика Существуют различные подходы к оценке рисков, связанных с загрязнением микропластиком, и указанные статьи представляют и анализируют некоторые из них (Akkajit et al., 2023).

Экологические модели риска – учитывают концентрацию микропластика в различных матрицах (вода, осадки, биота), его размер, форму, тип полимера и потенциальную опасность для экосистем. Например, анализируется распределение микропластика по размерам (малые и крупные частицы), преобладающие формы (чаще всего волокна), а также наиболее распространенные полимеры (полиэтилен, полиуретан, полиамид) и их токсикологические профили

Модели оценки риска для здоровья человека включают анализ путей поступления микропластика в организм (через воду, пищу, воздух), его способности проникать через биологические барьеры, вызывать воспалительные процессы, окислительный стресс и повреждать клеточные структуры. Также рассматриваются риски, связанные с переносом патогенных микроорганизмов на поверхности микропластика.

Недостатки рассмотренных исследований. Несмотря на ценность представленной информации, указанные работы имеют определенные ограничения. Ряд исследований

ограничивают применимость своих выводов из-за сосредоточения на конкретных географических областях или экосистемах. Некоторые работы используют относительно небольшие выборки, что может повлиять на репрезентативность результатов. Использование различных методологических подходов в разных исследованиях может затруднять прямое сопоставление, что подчеркивает необходимость унификации процедур отбора проб и анализа. Отмечается недостаток исследований, комплексно изучающих воздействие загрязнения микропластиком на окружающую среду и здоровье человека, что указывает на необходимость проведения более масштабных исследований в данной области. Конкретные ограничения исследований представлены в таблице 2.

В будущих исследованиях необходимо сосредоточиться на следующих направлениях для дальнейшего изучения вопросов охраны окружающей среды и здоровья на рабочем месте в контексте загрязнения микропластиком:

Долгосрочные исследования. Исследовательские проекты, осуществляемые на протяжении многих лет или десятилетий, могут дать более полное представление о долгосрочных последствиях загрязнения микропластиком и динамике изменений.

Географическая диверсификация. Для оценки глобальных закономерностей распространения микропластика необходимо расширить географический охват исследований, включив в них более широкий спектр регионов и экосистем.

Оценка воздействия на здоровье и окружающую среду. Для определения влияния загрязнения микропластиком на здоровье человека и состояние окружающей среды необходимо проведение углубленных анализов. Научные исследования должны раскрывать механизмы воздействия загрязненных морепродуктов на организмы, а также возможные последствия для здоровья человека.

Таблица 2. Ограничения, указанные в отобранных статьях

Ограничения	Ссылка
Масштаб работы сужен территориальными рамками. Отсутствуют исчерпывающие сведения о влиянии на окружающую среду.	(Akkajit et al., 2023)
Недостаточно изучены специфические морские экосистемы. Применялись различные подходы к отбору проб и анализу данных, что создает сложности для сравнения результатов.	(Polidoro et al., 2022)
Эксперимент проведен на единственном пляже. Не учитывался микропластик мельче 1 мм.	(Luqman et al., 2021)
Оценка ограничивается анализом микропластика, образующегося от одноразовых масок, и не затрагивает другие актуальные вопросы, появляющиеся в связи с пластиковыми отходами во время пандемии.	(Song et al., 2022)
Исследование проведено на нескольких пляжах Китая. Не учитывались микрочастицы размером менее 1 мм.	(Zhang et al., 2022)
Работа посвящена сбросам сточных вод из очистных сооружений на юго-востоке Испании. Медицинское исследование ограничено. Последствия для здоровья не изучены.	(Bayo et al., 2023)
Небольшое количество образцов и исследование только одного озера с пресной водой. Минимальное изучение экологических последствий.	(David et al., 2023)
Акцент сделан на водохранилище Уболратана в Таиланде. Ограниченная оценка последствий для здоровья.	(Kasamesiri et al., 2023)

Стандартизация. Разработка единых стандартизированных процедур для отбора проб, анализа и представления результатов исследований по микропластику позволит обеспечить более надежное сравнение данных между различными исследованиями.

Стратегии снижения негативного воздействия. В будущих исследованиях необходимо уделить внимание разработке и оценке эффективных методов снижения негативного воздействия, таких как совершенствование управления отходами, разработка экологически безопасных альтернатив пластику и внесение изменений в законодательство.

Сотрудничество. Развитие междисциплинарного сотрудничества между учеными-экологами, специалистами в области здравоохранения, политиками и представителями бизнеса может стать эффективной стратегией борьбы с загрязнением микропластиком.

Рекомендации. Для эффективного сокращения загрязнения микропластиком необходим комплексный подход. Прежде всего, следует оптимизировать системы управления отходами для минимизации утечки пластика путем совершенствования сбора и переработки отходов, а также продвижения ответственных методов утилизации. Крайне важно сократить использование одноразовых пластиковых изделий посредством внедрения соответствующей политики и продвижения экологически чистых альтернатив. Для предотвращения попадания микропластика в водные экосистемы необходимо модернизировать системы очистки сточных вод, используя передовые технологии фильтрации. Для обеспечения сопоставимости данных между исследованиями необходимо разработать стандартизированные протоколы измерений. Для комплексного решения этой проблемы необходимо сотрудничество между учеными,

медицинскими работниками, политиками и представителями бизнеса в различных областях. Важно повышать осведомленность общественности и поощрять ответственное потребление и утилизацию посредством информационных кампаний. Поддержка исследований экологически чистых материалов и упаковочных решений, проведение долгосрочного мониторинга, оценка экологического и медицинского воздействия, а также содействие международному сотрудничеству посредством глобальных соглашений являются важными шагами. Внедрение таких мер, как ограничения на производство и предельные концентрации, а также продвижение принципов циркулярной экономики, помогут сократить загрязнение микропластиком, сохранить экосистемы и защитить здоровье человека.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, авторами был проведен анализ проблемы загрязнения окружающей среды микропластиком, особенно в контексте морских акваторий и пресноводных водоемов, пищевых цепей и возможных негативных последствий для здоровья человека. Приведены результаты научных исследований (на сегодняшний день), выявляющих широкое распространение микропластика в различных экосистемах, и раскрывающих сложность динамики накопления и миграции этих частиц.

Анализ показал, что микропластик присутствует практически повсеместно – от глубоких слоев океана до поверхностных вод и городского воздуха. Это свидетельствует о критичности проблемы и требует срочных мер и действий.

Предполагается, что наличие микропластика в организме животных и человека потенциально связано с биологическими нарушениями и заболеваниями. Потребление рыбы и морепродуктов, загрязненных микропластиком, вызывает серьезные опасения.

Источником загрязнений становятся антропогенные факторы, такие как промышленность, туризм, неправильная утилизация отходов и загрязнение канализационными системами. Частицы постепенно аккумулируются в воде, почве и атмосфере, создавая замкнутый цикл.

Выявлены значительные ограничения текущих исследований, касающиеся ограниченной выборки, узкого охвата регионов и отсутствия комплексной оценки рисков для здоровья и экологии. Необходима разработка и принятие российских и международных программ, объединяющих усилия ученых, медиков и политиков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Беляев В.А., Педченко А.П., Седлецкий И.В. Актуальные направления исследований микропластика в морях российской Арктики // В сб.: Материалы науч.-практ. конф. «Рыбохозяйственная наука. История, современность, перспективы», посв. 110-летию ГосНИОРХ им. Л.С. Берга (С.-Петербург, 23–24 октября 2024 г.). 2024а. С. 55–61.

Беляев В.А., Седлецкий И.В., Педченко А.П. Влияние загрязнения морской среды микропластиком на рыбные ресурсы и аспекты продовольственной безопасности. Часть 1 // Исп. и охр. природн. ресурс. России, 2024 б. № 3 (179). С. 35–40.

Седлецкий И.В., Беляев В.А., Плинер Ю.И., Камшуков С.В. Полимерное загрязнение долгинской сельди (*Alosa braschnikowi*) на Северном Каспии. В сб.: «Микропластик как новейший токсикант позвоночных животных». Матер. Конф. ИПЭЭ РАН им. А.Н. Северцова и ГНЦ ФГБНУ ВНИРО (Москва, 4–5 декабря), 2025а. С. 43

Седлецкий И.В., Беляев В.А., Строганов А.Н. Попадание микропластиков в организм промысловых рыб: текущий опыт и перспективы // Экология: XVI Международный форум: 5–6 июня 2025 г., Москва: сб. докладов. Москва: АНО Центр содействия природ. инициат.

- «Экология», 2025б. С. 113–118. Akkajit P., Khongsang A., Thongnonghin B. Microplastics accumulation and human health risk assessment of heavy metals in *Marcia opima* and *Lingula anatina*, Phuket. Marine Pollution Bulletin, 2023. V. 186. P. 114404
- Bayo J., López-Castellanos J., Olmos S., Rojo D. A holistic approach on the impact of microplastic discharge from WWTPs to the neighboring environment in Southeast Spain. Water Research, 2023. V. 244. P. 120516.
- Bashir S.M., Kimiko S., Mak C.W. et al. Personal Care and Cosmetic Products as a Potential Source of Environmental Contamination by Microplastics in a Densely Populated Asian City // Front. Mar. Sci. 2021. V. 8. P. 683482.
- Boerger C.M., Lattin G.L., Moore S.L., Moore C.J. Plastic ingestion by planktivorous fishes in the North Pacific Central Gyre // Marine Pollution Bulletin. 2010. V. 60. P. 2275–2278.
- Bostan N., Ilyas N., Akhtar N. et al. Toxicity assessment of microplastic (MPs); a threat to the ecosystem. Environ. Res. 2023. V. 234. P. 116523.
- David T.I., Sheela M.S., Krishnakumar S. et al. Distribution and characterization of microplastics and ecological risks in Vellayani Lake, Kerala, India // Total Environment Research Themes, 2023. V. 7. P. 100065.
- Devriese L.I., van der Meulen M.D., Maes T. et al. Microplastic contamination in brown shrimp (*Crangon crangon*, Linnaeus 1758) from coastal waters of the Southern North Sea and Channel area // Marine Pollution Bull. 2015. V. 98. P. 179–187.
- De Witte B., Devriese L., Bekaert K. et al. Quality assessment of the blue mussel (*Mytilus edulis*): comparison between commercial and wild types // Marine Pollution Bull. 2014. V. 85. 146–155.
- Espinosa C., Cuesta A., Esteban M.A. Effects of dietary polyvinylchloride microparticles on general health, immune status and expression of several genes related to stress in gilthead seabream (*Sparus aurata* L.) // Fish and Shellfish Immunology. 2017. V. 68. P. 251–259.
- Herrera A. Bioaccumulation of additives and chemical contaminants from environmental microplastics in European seabass (*Dicentrarchus labrax*) // Sci. of the Total Environment. 2022. V. 822. P. 153–396.
- Kasamesiri P., Panchan R., Thaimuangphol W. Spatial-Temporal Distribution and Ecological Risk Assessment of Microplastic // Pollution of Inland Fishing Ground in the Ubolratana Reservoir, Thailand. Water, 2023. V. 15(2). 330 p.
- Kole P., Löhr A.J., van Belleghem F.G.A.J., Ragas A.M.J. Wear and tear of tyres: A stealthy source of microplastics in the environment // Int. J. Environ. Res. Public Health, 2017. V. 14. 1265 p.
- Li J., Yang D., Li L., Jabeen K., Shi H. Microplastics in commercial bivalves from China // Environmental Pollution. 2015. V. 207. P. 190–195.
- Luqman A., Nugrahapraja H., Wahyuono R.A. et al. Microplastic contamination in human stools, foods, and drinking water associated with Indonesian coastal population // Environments, 2021. V. 8(12). 138 p.
- Lusher A.L., McHugh M., Thompson R.C. Occurrence of microplastics in the gastrointestinal tract of pelagic and demersal fish from the English Channel // Marine Pollution Bull. 2013. V. 67. P. 94–99.
- Neves D., Sobral P., Ferreira J.L., Pereira T. Ingestion of microplastics by commercial fish off the Portuguese coast // Marine Pollution Bull. 2015. V. 101. P. 119–126.
- Niloy M.R.R., Chowdhury O.S. Effectiveness of Household Water Treatment Technologies Based on WHO Guidelines. Master's Thesis, Islamic University of Technology (IUT), Gazipur. 2017. 103 p.
- Polidoro B., Lewis T., Clement C.A. Screening-level human health risk assessment for microplastics and organic contaminants in near-shore marine environments in American Samoa. Heliyon, 2022. V. 8 (3). P. 1–10.
- Phillips M.B., Bonner T.H. Occurrence and amount of microplastic ingested by fishes in watersheds of the Gulf of Mexico // Marine Pollution Bull. 2015. V. 100. P. 264–269.

Rabin M. H., Wang Q., Enyoh C.E., Kai X. Distribution, Potential Sources, and Health Risk of Microplastics (MPs) in Street Dust during and after COVID-19 Lockdown in Bangladesh. *Environments*, 2023. V. 10(7). P. 130.

Rochman C.M., Tahir A., Williams S.L. Anthropogenic debris in seafood: plastic debris and fibers from textiles in fish and bivalves sold for human consumption // *Scientific Reports*. 2015. V. 5. P. 14340.

Rummel C.D., Loder M.G., Fricke N.F. et. al. Plastic ingestion by pelagic and demersal fish from the North Sea and Baltic Sea // *Marine Pollution Bull.* 2016. V. 102. P. 134–141.

Song G., Cao H., Liu L., Jin M. Analysis of Marine Microplastic Pollution of Disposable Masks under COVID-19 Epidemic-A DPSIR Framework // *International J. of Environmental Research and Public Health*, 2022. V. 9(23) P. 16299.

Sobhani Z., Lei Y., Tang Y. et. al. Microplastics generated when opening plastic packaging // *Sci. Rep.* 2020, 10, 4841.

Van Cauwenberghe L., Claessens M., Vandegheuchte M.B., Janssen C.R. Microplastics are taken up by mussels (*Mytilus edulis*) and lugworms (*Arenicola marina*) living in natural habitats // *Environmental Pollution*. 2015. V. 199. P. 10–17.

Zhai X., Zheng H., Xu Y., Zhao R. et. al. Characterization and quantification of microplastics in indoor environments // *Heliyon*, 2023. V. 9(5). P. e15901.

Zhang P., Wei S., Zhang J., Zhong H. et. al. Seasonal distribution, composition, and inventory of plastic debris on the Yugang Park Beach in Zhanjiang Bay, South China Sea // *International J. of Environmental Research and Public Health*, 2022. V. 19(8). P. 4886.

AQUATIC ECOSYSTEMS

**MICROPLASTICS IN THE AQUATIC ENVIRONMENT
AND AQUATIC BIOLOGICAL RESOURCES**

© 2026 г. V.A. Belyaev¹, A.A. Lukin^{2,3}, I.V. Sedletsy¹

*1 – State Scientific Center of the Russian Federation «VNIRO»,
Russia, Moscow, 105187*

2 – South Ural State Agricultural University, Russia, Chelyabinsk, 454080

*3 – South Ural State Agricultural University
(National Research University), Russia, Chelyabinsk, 454080*

The review is devoted to the study of marine environmental pollution by microplastics and its negative impact on fish resources, food security and human health. Numerous studies are presented demonstrating the presence of microplastics in marine ecosystems and its effect on various types of marine organisms, including fish. The ways of microplastics penetration into food chains are described and possible consequences for human health are considered. The importance of continuing research and developing comprehensive measures to reduce the negative impact of microplastics on marine ecosystems and human health is emphasized.

Keywords: marine pollution, microplastics, fish resources, food security, human health, biological accumulation