

УДК 556

МИКРО- И НАНОПЛАСТИК В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ РОССИИ И ПРОБЛЕМЫ ЕГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Екатерина Сергеевна Казак^{1✉}, Елена Александровна Филимонова²,
Александра Евгеньевна Преображенская³

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; Kanigu@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; EA.Filimonova@yandex.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; Shur_gmur@mail.ru

Аннотация. В последнее время появляется много работ, посвященных загрязнению пластиком природной среды. Активное внимание уделяется частицам микропластика (МП) размером <5 мм и нанопластику (НП) размером <100 нм. Частицы МП и НП находят практически повсеместно: в водах и донных отложениях Мирового океана, речных, озерных и подземных водах, пляжевых отложениях и даже в снегах и льдах Арктики и Антарктики, в продуктах питания, бутилированной воде, в живых организмах всех этапов пищевой цепи. Загрязнение пластиком природной среды уже стало такой же глобальной проблемой, как и изменение климата. Представлены результаты анализа и обобщения актуальной опубликованной литературы, посвященной проблемам загрязнения МП и НП природных вод преимущественно на территории Российской Федерации. Впервые построена схематическая карта распространения МП в поверхностных водах России. Представлена сводная таблица о концентрации МП в поверхностных, подземных, бутилированных минеральных и водопроводных водах, донных осадках рек, морей и океанов мира. Наглядно показано, что существует дефицит исследований загрязнения МП и НП в подземных водах, хотя содержание полимеров в них также достаточно велико.

Затронута проблема измерения содержания МП и НП и определения их состава, освещены особенности, достоинства, недостатки и ограничения всех основных методов детектирования. Представлены обобщенные схемы отбора и подготовки проб воды и грунта для последующего определения МП. Сделан обоснованный вывод, что на данный момент не существует оптимального метода, только комплексирование методов позволяет наилучшим образом идентифицировать загрязнение МП и НП.

Ключевые слова: микропластик, нанопластик, загрязнение подземных вод, распространение микропластика

Для цитирования: Казак Е.С., Филимонова Е.А., Преображенская А.Е. Микро- и нанопластик в природных водах России и проблемы его определения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 6. С. 110–123.

MICRO- AND NANOPLASTICS POLLUTION IN THE AQUATIC ENVIRONMENTS IN RUSSIA AND DETECTION PROBLEMS

Ekaterina S. Kazak^{1✉}, Elena A. Filimonova², Alexandra E. Preobrazhenskaya³

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; Kanigu@mail.ru

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; EA.Filimonova@yandex.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; Shur_gmur@mail.ru

Abstract. Recently, there are more and more investigations devoted to plastic pollution of the natural environment. In this case an active attention is paid to microplastic particles (MPs) less than 5 mm size and nanoplastic particles (NPs) less than 100 nm in size. MP and NP particles are found practically everywhere: in waters and bottom sediments of the World Ocean, river, lake and groundwater, beach sediments and even in snow and ice of the Arctic and Antarctic, in foodstuff, bottled water, in living organisms at all stages of the food chain. Plastic pollution of the natural environment has already become as global as climate change. This article presents the results of the analysis and summary of the current published literature devoted to the problems of MP and NP pollution of natural waters, mainly on the territory of the Russian Federation. For the first time, a schematic map of MP distribution in surface waters of Russia is constructed. A summary table on MP concentrations in surface water, groundwater, bottled mineral and tap water, bottom sediments of rivers, seas and oceans of the world is presented. It is clearly shown that there is a shortage of studies of MP and NP contamination in groundwater, although their content is also quite high.

In addition, the paper touches upon the problem of measuring the MP and NP content and determining its composition, highlights the features, advantages, disadvantages and limitations of all the main detection methods. The summarized schemes of water and soil sampling and preparation for the following MP determination are presented. A reasonable conclusion is made that at the present moment there is no one optimum method, and only a combination of methods allows to identify MP and NP contamination in the best way.

Key words: microplastics, nanoplastics, groundwater pollution, spread of microplastics

For citation: Kazak E.S., Filimonova E.A., Preobrazhenskaya A.E. Micro- and Nanoplastics pollution in the aquatic environments in Russia and detection problems. *Moscow University Geol. Bull.* 2022; 6: 110–123. (In Russ.).

Введение. Растущая с каждым годом популярность использования пластиковых изделий привела к серьезным экологическим проблемам: мусорные острова в Тихом океане, свалки вокруг Пекина, Нью-Йорка и других мегаполисов и пр. Низкая стоимость, малый вес, биоинертность, прочность и износостойкость полимеров определяют ежегодный рост производства пластиковых изделий [Казмирук, 2020; Козловский, Блиновская, 2015]. В 2016–2020 гг. было произведено 335–368 млн т полимеров (без учета биоразлагаемого пластика) по сравнению с 1,5 млн т в 1950 г. [<https://plasticseurope.org>], ежегодный прирост составлял 11–12 млн т, и только пандемия КОВИД-19 сдержала рост промышленности пластмасс в 2020 г. на уровне производства 2019 г. Наибольшее количество пластика производится в Китае (35% от общего объема), в странах Северной Америки (19%), Европе (15%). В России выпуск пластмассы в 2020 г. составил 10,2 млн т [<https://rosstat.gov.ru/>].

Срок службы пластиковых изделий варьирует от нескольких минут для одноразовой посуды до десятков лет для материалов, используемых в строительстве, при этом упаковочный материал составляет 54% пластиковых отходов. Суммарное количество пластиковых отходов достигло к 2017 г. 8300 млн т, при этом только около 9% было переработано, 12% сожжено, а остальные 79% отходов накоплено на свалках, полигонах твердых бытовых отходов или в природной среде [Geyer et al., 2017]. Пандемия КОВИДА увеличила количество полимерных медицинских отходов в 2021 г. на 8,3 млн т [Peng et al., 2021].

Не только обычный пластиковый мусор несет опасность: крупные пластиковые остатки медленно, но постоянно разрушаются в результате влияния солнечной радиации, механического и биологического воздействия. Этот процесс порождает огромное количество макро-, микро- и наночастиц, которые и несут наибольшую опасность для окружающей среды. Мелкие частицы пластмассы объединяются понятием «микропластик» (МП), куда входят полимерные частицы и волокна размером <5 мм [Thompson et al., 2004], также выделяется нанопластик (НП) размером <100 нм. Частицы МП способны сорбировать и переносить загрязняющие вещества. Большинство полимеров содержит в своей молекулярной структуре гидрофобные радикалы, способные образовывать с находящимися в природных водах веществами устойчивые соединения. Благодаря значительной удельной поверхности полимеров на частицах сорбируются стойкие органические загрязнители (СОЗ) и тяжелые металлы, в результате концентрация загрязнителей на частицах может на порядки превышать их естественный фон в

морской воде или в донных отложениях [Казмирук, 2020; Румянцев et al., 2019; Cole et al., 2014]. Морская фауна, съедающая подобные пластиковые частицы, может погибнуть из-за летальных доз СОЗ, негативное влияние оказывается и на человека, потребляющего загрязненные морепродукты.

Первые исследования, посвященные проблеме МП в окружающей среде, начались в 1970-х гг. В 2004 г. число публикаций достигало 70. Это научное направление стало активно развиваться после 2004 г., когда Р.С. Томпсон ввел понятие «микропластик». За 2018–2020 гг. объем публикаций по теме исследования МП и НП составил 2335 статей [Zhou et al., 2022].

Частицы МП и НП находятся практически повсеместно: в водах и донных отложениях Мирового океана, речных, озерных и подземных водах, пляжевых отложениях и даже в снегах и льдах Арктики и Антарктики [Bergmann et al., 2019; Frei et al., 2019; Hurley et al., 2018; Samandra et al., 2022; Zobkov et al., 2020], в продуктах питания, бутилированной воде, в живых организмах всех этапов пищевой цепи [Казмирук, 2020]. Загрязнение пластиком природной среды стало такой же глобальной проблемой, как и изменение климата, поэтому ежегодно растет число работ, посвященных изучению МП и НП. Важно отметить, что основное внимание научного сообщества уделяется проблеме загрязнения МП и НП поверхностных вод, преимущественно морям и океанам, в последние годы активно изучают также пресные воды суши, в то время как исследованиям МП и НП в подземных водах посвящено лишь несколько обзорных зарубежных статей [Re, 2019; Panno et al., 2019; Samandra et al., 2022], российские публикации на эту тему отсутствуют. Важный шаг в исследовании МП и НП в подземных водах — работа немецких коллег, посвященная вопросам миграции полимеров в аллювиальных отложениях [Goepfert, Goldscheider, 2021].

Однозначного мнения о том, насколько токсичны МП и НП для живых организмов, нет. В ряде источников приведены данные о минимальном воздействии МП и НП на некоторые виды бактерий, дрожжей, фито- и простейших, нематод [Goepfert, Goldscheider, 2021]. В других исследованиях показано токсическое воздействие МП и НП и связанных с ними загрязняющих веществ на беспозвоночных, позвоночных, морских птиц и даже млекопитающих [Karbalaei et al., 2018; Triebkorn et al., 2019]. Случаи смерти после употребления МП и НП не зарегистрированы, но установлено, что их употребление беспозвоночными снижает скорость соматического роста, изменяет метаморфоз, снижает репродуктивную способность и вызывает окислительное

повреждение [Triebkorn et al., 2019]. Воздействие МП на позвоночных животных может происходить также при проглатывании других организмов, вынужденных употреблять МП и НП, или при прямом поглощении фрагментов пластика из загрязненных вод или отложений. На примере мышей показано, что при приеме внутрь и вдыхании МП может накапливаться в печени и селезенке [Karbalaei et al., 2018]. Пероральное введение полистирольных МП вызывает его накопление в кишечнике и почках, что очевидно влияет на окислительно-восстановительный баланс, изменяет энергетический гомеостаз и нейротоксичность [Koelmans et al., 2019].

Основной путь попадания МП и НП в организм человека — вдыхание, употребление контаминированных пищевых продуктов и воды, что может привести к воздействию на желудочно-кишечный тракт, нарушению проницаемости эпителия, локальным воспалительным процессам и изменениям состава кишечной микробиоты, бронхиальным реакциям, воспалительным и фиброзным изменениям в бронхиальной и перибронхиальной ткани и др. [Karbalaei et al., 2018].

Рассмотрим виды и источники МП и НП, обобщив исследования количественных оценок загрязнения МП и НП природных вод в России. Нами выполнен обзор методов идентификации количества частиц МП и НП и химического состава полимеров.

Виды и источники микро- и нанопластика. Микропластик объединяет широкую группу полимеров различного химического состава, размера, формы, цвета и происхождения. В настоящее время существует несколько размерных градаций, по которым частицы следует относить к микропластику: < 1 мм [Browne et al., 2007]; < 2 мм [Ryan et al., 2009]; > 1,6 мкм [Ng, Obbard, 2006]; 2–6 мм [Derraik, 2002]; < 10 мм [Graham, Thompson, 2009]. Наиболее распространенной границей размера МП служит размер частиц < 5 мм [Cole et al., 2011; Zobkov et al., 2020], который утвердило Национальное управление океанических и атмосферных исследований (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA [Arthur et al. 2009]). К наночастицам рекомендуется относить гранулы размером 1–100 нм [Commission European, 2011], есть и другие градации нанопластика: 1 мкм–1 нм, < 1000 нм [Казмирук, 2020; Mariano et al, 2021]. В работе [Румянцев и др., 2019] приведена следующая классификация подразделения частиц пластика по размеру на нанопластик (< 1 мкм), малый микропластик (< 1 мм), крупный микропластик (1–5 мм), микропластик (< 5 мм), мезопластик (< 25 мм), макропластик (> 25 мм) и мегапластик (> 1 м).

Пластмассу формируют полимеры разнообразного химического состава и свойств. В состав полимеров входят полиэтилен (PE), полипропилен (PP), полистирол (PS), полиэтилентерефталат (PET), поливинилхлорид (PVC), полиуретан (PUR), тефлон (PTFE), нейлон (Nylon) и др. Плотность пластиков

изменяется от 0,01–0,04 (экструзионный пенополистирол) до 1,2–2,3 г/см³ (политетрафторэтилен). Свойства пластика могут изменяться в процессе нахождения в окружающей среде, например, за счет обрастания микроорганизмами, процессов сорбции на поверхности пластика или агрегации с органическими частицами, при этом первоначальная плотность увеличивается.

МП и НП по происхождению подразделяются на два вида: первичный и вторичный. Первичные полимеры представляют собой микрогранулы, специально изготовленные для использования в косметических, лекарственных и моющих средствах, средствах личной гигиены, при дробеструйной обработке или в виде пеллет, используемых для производства более крупных изделий [Казмирук, 2020; Cole et al., 2011; Derraik, 2002]. Частицы первичного МП и НП в исходном виде попадают в окружающую среду со сточными водами или через очистные сооружения, так как размер гранул не позволяет их отфильтровать. Вторичные МП и НП образуются при распаде крупных полимерных продуктов: при истирании шин, разрушении дорожного покрытия, дефрагментации пластикового мусора на суше и в Мировом океане, при стирке, производстве синтетических тканей. МП и НП, образованные при стирке синтетических изделий, некоторые исследователи относят к категории первичного пластика (рис. 1). Подсчитано, что доля частиц вторичного МП составляет 70–80% от общего количества МП, поступающего в среду.

МП и НП также классифицируют на основе их физических свойств, таких, как плотность (легкие/тяжелые), твердость (твердые/мягкие) или форма (фрагменты, шарики, нити и гранулы) [Hidalgo-Ruz et al., 2012].

Дегградация МП и НП — функция их физических и химических свойств, способности взаимодействовать с другими загрязнителями, она зависит от особенностей внешней среды [Verla et al., 2019]. В процессе дегградации и разложения МП и НП могут выделять различные токсичные химические вещества, потенциально опасные для здоровья живых организмов. Основной процесс разложения пластика на суше — фотоокисление, в морской среде оно происходит значительно медленнее, однако добавляются процессы механической абразии за счет волновой активности и биодегградация преимущественно микроорганизмами [Efimova et al., 2018].

В дополнение к дегградации частички МП и НП, обладающие большой удельной поверхностью, могут накапливать на поверхности органические загрязнители из окружающей среды: полиароматические углеводороды, хлорорганические пестициды, полихлорированные бифенилы и тяжелые металлы [Verla et al., 2019]. Таким образом, частички МП и НП выступают в роли транспортного средства для переноса различных токсичных химических веществ в окружающей среде, адсорбированных на их по-

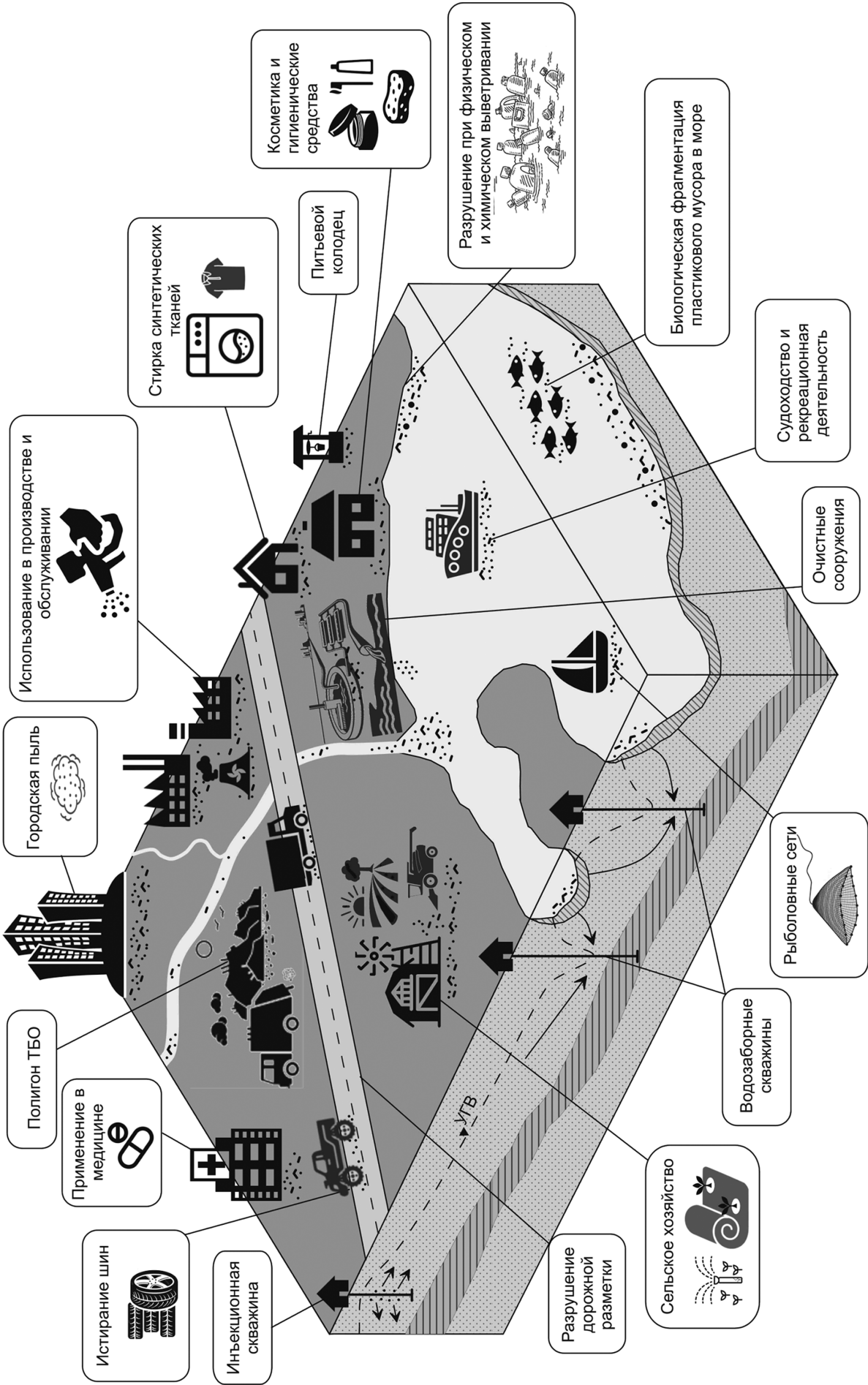


Рис. 1. Потенциальные источники загрязнения микро- и нанопластиком природных вод (схема переработана и дополнена по данным [Karbalaie et al., 2018])

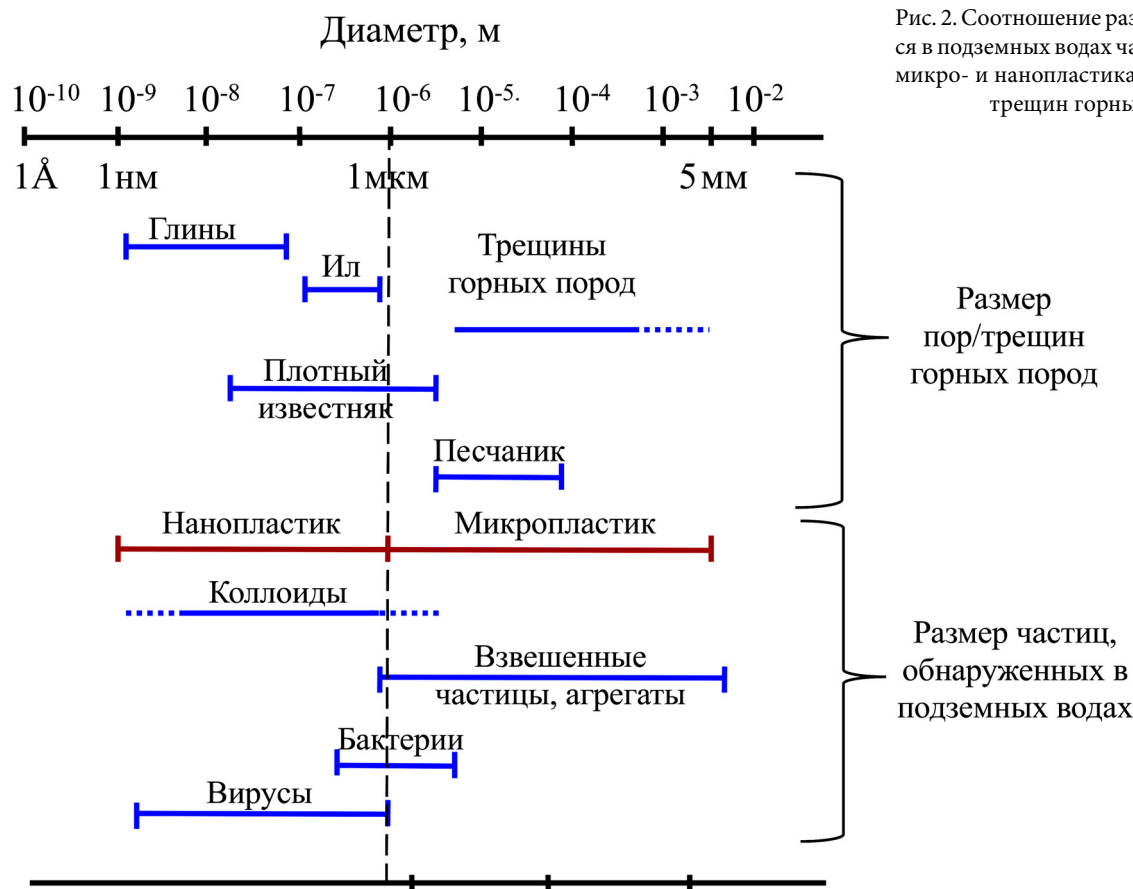


Рис. 2. Соотношение размера находящихся в подземных водах частиц, в том числе микро- и нанопластика, и размера пор и трещин горных пород

верхности. При попадании в донные осадки, водоносные горизонты или живые организмы токсичные вещества высвобождаются в процессе десорбции и аккумулируются в новой системе.

Большинство исследований загрязнения МП и НП сосредоточено на поверхностных водах. В последние несколько лет стали появляться исследования, направленные на изучение загрязнения МП и НП подземных вод [Goerpert, Goldscheider, 2021; Panno et al., 2019; Re, 2019]. Однако информации о миграции и трансформации пластиковых микро- и нановолокон в системе подземная вода–порода крайне мало. Очевидно, что зона аэрации и водовмещающие породы выступают естественным фильтром, который должен задерживать частицы и волокна МП и НП, в связи с этим следует ожидать их низкое содержание в водоносном горизонте. Однако мелкая фракция НП благодаря небольшим размерам может успешно достигать водоносного горизонта и мигрировать с потоком подземных вод к водозаборным скважинам (рис. 2).

Распространение микро- и нанопластика в подземных и поверхностных водах. Исследования загрязнения МП и НП поверхностных вод суши и их донных отложений проводятся во всем мире в большом масштабе. Частицы МП и НП обнаружены в США и Канаде, Австралии, ЮАР, Китае, а также в европейских странах. В донных отложениях р. Ротер-Майн (Германия) частицы МП размером 500–5000 мкм были обнаружены на глубине 0,6 м в

малой концентрации (<1 шт/кг сухого веса). В одной пробе исследовали содержание более мелких частиц (20–500 мкм), наибольшее количество МП (~30 000 шт/кг) обнаружено в размерном диапазоне 20–50 мкм [Frei et al., 2019]. В реках Великобритании содержание частиц МП в донных отложениях в отдельных пробах достигало 75 000 шт/кг, при этом размер исследованных частиц был не менее 63 мкм [Hurley et al., 2018].

Китайские ученые исследовали распространение и свойства МП в поверхностных водах озер Донгтинг и Хонг в среднем течении р. Янцзы [Wang et al., 2018]. Концентрация МП в этих озерах составила 900–2800 и 1250–4650 шт/м³ соответственно. Доминирующая форма частиц — волокна, а по составу — полиэтилен и полипропилен.

Масштабные исследования содержания МП и НП в поверхностных водах было проведено в провинции Гаутенг и в Северо-Западной провинции ЮАР [Bouwman et al., 2018]. В процессе исследования опробованию подверглись несколько рек, из которых суммарно отобрали 43 пробы. В среднем содержание частиц размером 20–1500 мкм составило 0,82 шт/л. Более 90% обнаруженных частиц имеет размер 20–300 мкм. В двух пробах получены аномальные значения концентрации МП — 38–56 шт/л. Авторы сопоставили полученные результаты с данными предыдущих исследований и пришли к выводу, что наибольшая концентрация МП и НП в водной среде характерна для развитых стран.

В Японском море неоднократно проводились работы по исследованию загрязнения МП, однако количественные характеристики до сих пор отсутствуют. Качественный анализ обнаруженных частиц показал, что МП представлен преимущественно полиэтиленом, полипропиленом, частицами целлюлозы, выявлено некоторое количество метилфениламина, формальдегида, монокарбосидов [Блиновская, Якименко, 2018].

Измеренные величины концентрации МП в воде Финского залива составляют 0,7–4,7 шт/л, в донных отложениях — 30–120 шт/кг [Поздняков и др., 2020]. По форме частиц во всех пробах преобладают фрагменты пластика (96%), микроволокна (3%) и микрогранулы (1%), по химическому составу полимеры в основном представлены полиэтилентерефталатом.

Пространственную и временную закономерности распределения МП анализировали в Севастопольской бухте Крымского полуострова, за период исследования содержание МП составило 0,6–7 шт/м³, при этом концентрация отличалась в разные даты отбора [Mukhanov et al., 2019]. Доля волокон среди микрочастиц варьировала от 7 до 75%; аналогично содержанию частиц она не зависит от места и времени отбора. Выявить какие-либо закономерности распределения МП не удалось, что объясняется многофакторностью процессов образования, движения и накопления МП.

В работе [Kane, Clare, 2019] обобщены данные определения содержания МП в глубоководных морских донных отложениях. В обзор включено 49 определений содержания МП в донных отложениях Атлантического, Тихого, Северного Ледовитого и Индийского океанов, Северного, Средиземного и Черного морей. Частицы МП обнаружены повсеместно на морском дне по всему миру. Концентрация частиц в глубоководных отложениях (до 3000–4000 шт/л) сопоставима, а иногда и выше концентрации частиц в приливно-отливных и мелководных отложениях. Указанные авторы установили, что фрагменты МП в основном обнаружены недалеко от областей поступления мусора в моря и океаны, в то время как микроволокна имеют более широкое распространение и, вероятно, легко переносятся придонными течениями.

Определение концентрации и химического состава МП в поверхностных водах суши на территории Российской Федерации проводится сравнительно недавно. В России первые работы по изучению загрязнения МП были посвящены исследованию акватории, пляжевых и донных отложений Балтийского, Черного и Японского морей и Ладожского озера [Блиновская, Якименко, 2018; Bagaev et al., 2018; Efimova et al., 2018]. Однако в последние два года расширился круг объектов исследований и резко возросло число российских публикаций, выполнено несколько работ по определению МП в водах и донных отложениях Балтийского моря, водах арктических морей, появились исследования

речных и озерных вод [Ершова и др., 2021; Ильина и др., 2021; Поздняков и др., 2020; Esiukova et al., 2020; Frank et al., 2021a; Frank et al., 2021b; Lisina et al., 2020; Malygina et al., 2021; Zobkov et al., 2020].

Наиболее масштабные по пространственному охвату исследования загрязнения МП морской акватории Российской Федерации выполнены в рамках научной экспедиции «ТРАНСАРКТИКА-2019», в результате получена средняя концентрация 11,3 шт/м³ для морей российской Арктики и 143 шт/м³ для морей Дальнего Востока [Ершова и др., 2021]. Максимальное содержание МП составило 357 шт/м³, обнаружено в Охотском море, минимальное — 1 шт/м³ в Восточно-Сибирском море (табл. 1). Предварительный анализ показал, что по форме обнаруженные частицы относятся к волокнам и фрагментам, а по химическому составу — это полимеры типов полиэтилентерефталат, полипропилен и полиэтилен.

Детально изучено содержание МП в воде и донных отложениях Балтийского моря, наиболее изученного объекта отечественных исследователей [Bagaev et al., 2018; Efimova et al., 2018; Esiukova et al., 2020; Zobkov et al., 2020; Zobkov, Esiukova, 2017]. В результате работы нескольких научных экспедиций установлено содержание МП в воде в диапазоне от 92 до 933 шт/м³ (среднее 400 шт/м³); при этом содержание МП в осадках Балтийского моря варьирует от 107 до 10 179 шт/кг при среднем 876 шт/кг. Получен широкий спектр химического состава полимеров из донных отложений: полиэтилен (11,1%), полипропилен (8,3%), полиэтилентерефталат (4,6%), а также ацетат целлюлозы, поливинилхлорид, синтетический каучук, полистирол, нейлон и пр. [Esiukova et al., 2020]. К сожалению, значительную часть образцов (47,2%) не удалось идентифицировать из-за влияния синтетических красителей. Волокна составляют основную часть обнаруженного МП, их доля в воде составляет 89%, в морских осадках — 74,5%, также обнаружены фрагменты и пленки.

В связи со сложностью изучения и определения состава нанопластика работ, посвященных его распространению в природных водах, мало.

Несколько исследований выполнено относительно содержания МП в водах оз. Байкал, Ладожского озера, шести озер в южной части Сибири, выявлены значения концентрации полимеров в донных отложениях Онежского и Ладожского озер (рис. 3). Так, в Ладожском озере максимальная концентрация составляет 2400 шт/м³, содержание частиц МП в донных отложениях — 60–200 шт/кг [Поздняков и др., 2020]. Высокая концентрация полимеров $(4–26) \cdot 10^3$ шт/м³ обнаружена в алтайских озерах Западно-Сибирской платформы, несмотря на расположение озер на территории Алтайского и Катуньского заповедников. В среднем распределение МП в озерах по форме следующее: пленки (21%), фрагменты (37%), волокна (9%), пенопласт (14%) и гранулы (19%); однако оно значительно отличается в каждом озере [Malygina et al., 2021]. Например,

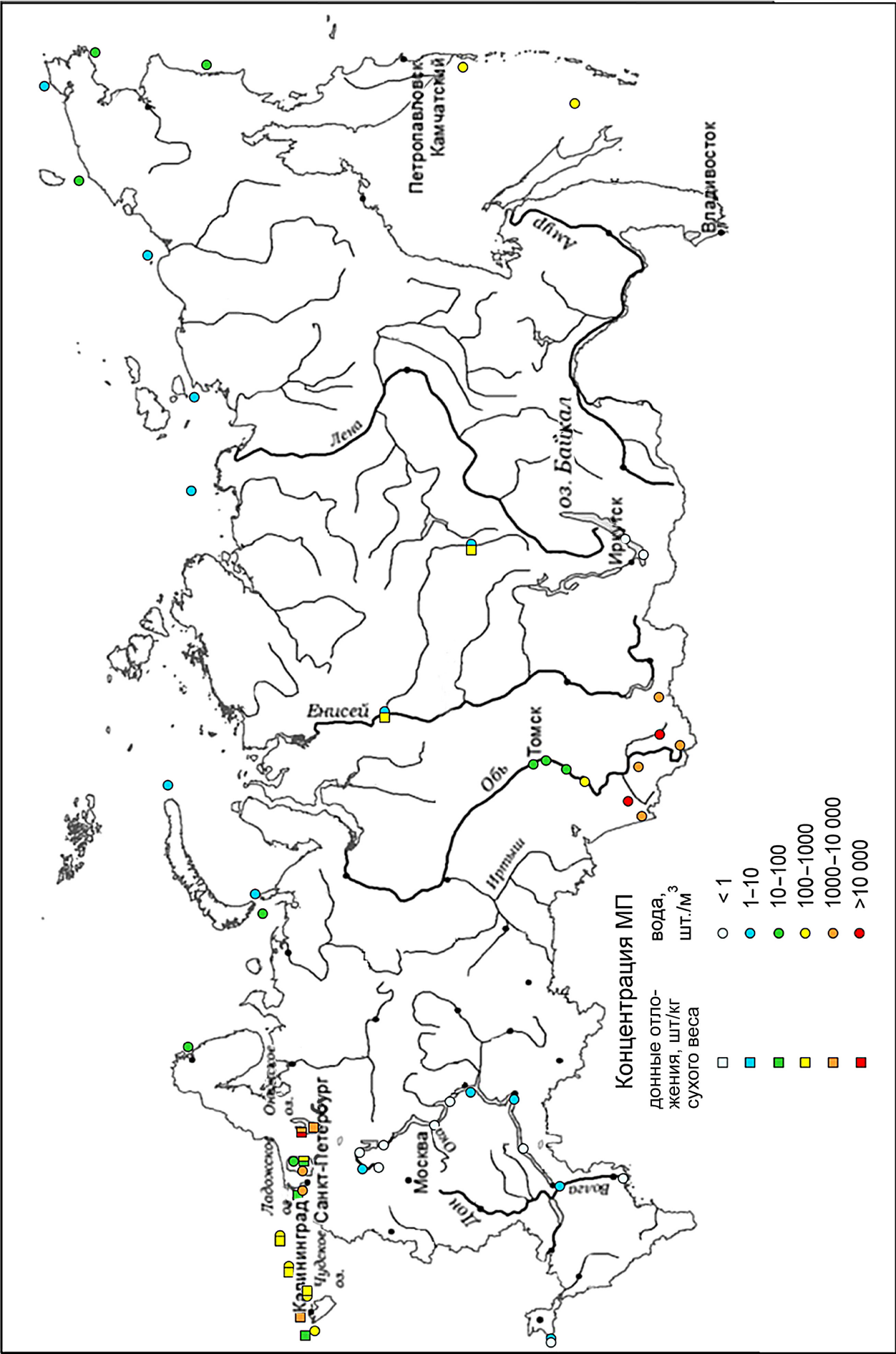


Рис. 3. Концентрация микропластика в природных водах и донных отложениях на территории России по результатам отечественных исследований. Карта построена по материалам [Ершова и др., 2021; Ильина и др., 2021; Поздняков и др., 2020; Esukova et al., 2020; Frank et al., 2021a, b; Lisina et al., 2020; Malygina et al., 2021; Zobkov et al., 2020]

Содержание микропластика в природных водах мира и России

Таблица 1

Объект	Размер частиц	Содержание	Источник
Снежный покров			
Лед, пролив Фрама, Северный Ледовитый океан	>11 мкм	0–14400 шт/л	[Bergmann et al., 2019]
Снег в горах, Швейцария, Германия		191–154000 шт/л	
Поверхностные воды			
Северное море	0,355–4,75 мм	0–1,5 шт/м ³	[Maes et al., 2017]
Мировой океан, глубина 1176–4881 м	5 мкм–1 мм	0,5 шт/л	[Казмирук, 2020]
ЮАР, река	20 мкм–1,5 мм	0,32–56 шт/л	[Bouwman et al., 2018]
Озера Донгтинг и Хонг, Китай	>50 мкм	0,9–4,7 шт/л	[Wang et al., 2018]
Водоохранилище Три ущелья, Китай	48 мкм–5 мм	1,6–12,6 шт/л	[Казмирук, 2020]
Водоохранилище, Чехия	>1 мкм	1383–2040 шт/л	
Река, Чехия		3123–4464 шт/л	
Донные отложения рек, морей и океанов			
Северное море	0,355–4,75 мм	0–3146 шт/кг	[Maes et al., 2017]
Река Ротер-Майн, Германия	500 мкм–5 мм	<1 шт/кг	[Frei et al., 2019]
	20–50 мкм	~30000 шт/кг	
Река Эруэлл и Мерси, Великобритания	63 мкм–5 мм	300–75000 шт/кг	[Hurley et al., 2018]
Тихий океан, Курило-Камчатский желоб, глубина 4869–5766 м	<1 мм	2,02 шт/м ²	[Kane, Clare, 2019]
Центральный арктический бассейн	>100 мкм	0–2 шт/10 г	
Подземные воды			
Австралия	18–491 мкм	16–97 шт/л	[Samandra et al., 2022]
Индия	0,12–2,5 мм	4,2–10,1 шт/л	[Huang et al., 2021]
США	45 мкм–1,5 мм	0,86–15,2 шт/л	
Германия	50–150 мкм	0–7 шт/л	
ЮАР	20 мкм–1,5 мм	0,12–0,29 шт/л	[Bouwman et al., 2018]
Вода после водоподготовки			
Бутилированная минеральная вода, Германия	>1 мкм	0–35462 шт/л	[Казмирук, 2020]
Бутилированная вода, Германия	5–100 мкм	2–241 шт/л	
Водопроводная вода, Дания	10–100 мкм	0–0,8 шт/л	[Strand et al., 2018]
	>100 мкм	0,08–0,6 шт/л	
Очищенные поверхностные воды, Чехия	>1 мкм	243–684 шт/л	[Казмирук, 2020]
Прочее			
Пляжные отложения, Южная Корея	50 мкм–5 мм	56–285673 шт/м ²	[Казмирук, 2020]
Италия, экскурсионные карстовые пещеры	0,1–5 мм	1600–4390 шт/кг	[Balestra, Bellopede, 2022]
Водопроводная вода, Китай	43 мкм–5 мм	0,20–1,73 шт/л	[Казмирук, 2020]

в оз. Кучукское в равном количестве (50%) выявлены волокна и микрогранулы, а в оз. Джулукуль аналогичные пропорции составляют фрагменты МП и пенопласта, в Телецком озере представлены все категории полимеров, включая как первичный, так и вторичный МП. Средняя концентрация МП в оз. Байкал составила 0,27 шт/м³, включая весь размерный ряд найденных частиц полимеров, при этом массовая доля МП в общей выборке составляет 42,4%, мезопластика — 12,4%, макропластика — 45,2% [Ильина и др., 2021]. По форме преобладают пленки (59,6%), также в общей выборке обнаружены фрагменты и волокна, первичный пластик отсутствует. Анализ химического состава прово-

дился только для выборки из 10 частиц, получены следующие результаты: полиэтилен составил 50%, полипропилен — 40%, полистирол — 10%. Детальное изучение донных отложений Онежского озера выявило экстремально высокую концентрацию МП в Кондопожской губе — до 217 000 шт/кг сухого веса. МП представлен преимущественно микрогранулами, следовательно, наблюдается загрязнение первичным МП, что, вероятно, обусловлено работой Кондопожского целлюлозно-бумажного комбината. Среднее содержание МП в осадках озера составило 2189±1164 шт/кг сухого веса, минимальное 266–380 шт/кг, МП представлен преимущественно волокнами, за исключением Кондопожской губы.

В последние два года началось исследование загрязнения МП крупных рек России. Детальные работы проведены группой исследователей географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова вдоль русла Волги: от истоков до устья отобраны 34 пробы, в которых концентрация МП составила 0,16–4,1 шт/м³ [Lisina et al., 2020]. Максимальная концентрация 1,9–4,1 шт/м³ установлена в районе крупных городов Казань, Нижний Новгород, Волгоград, Тверь (рис. 3). Аналогичные значения концентрации получены также в среднем течении Енисея — 1,2–4,5 шт/м³, при этом в донных отложениях — 235–543 шт/кг [Frank et al., 2021a]. На порядок выше содержание МП наблюдается в верхнем течении Оби и ее притоке Томи — 29,2–114 шт/м³, максимальная концентрация выявлена у г. Новосибирск [Frank et al., 2021b]. В воде Волги доля фрагментов и пленок МП составляла 41 и 37% соответственно, а доля волокон — 22%, по составу представлены преимущественно полиэтиленом и полипропиленом [Lisina et al., 2020]. В пробах воды из р. Енисей выявлены микроволокна, пленки и фрагменты пластика, в то время как в пробах из донных отложений р. Енисей основной тип МП — микроволокна, в небольшом количестве обнаружены пленки и фрагменты; микрогранулы и пеллеты не выявлены. В реках Томь и Обь преобладали микрофрагменты неправильной формы (47,4%), также обнаружены микроволокна (22,1%), микропленки (20,8%) и микрогранулы (9,74%). Сравнивая результаты трех исследований, можно сделать вывод, что первичный МП обнаружен только в речных пробах рек Обь и Томь, в Волге и Енисее наблюдается загрязнение вторичным МП.

Исследованиями содержания МП и НП в подземных водах во всем мире занималось всего несколько научных групп, в России это направление пока не развивается. Так, например, группой ученых из США [Huang et al., 2021] определено содержание МП в подземных водах грунтового водоносного горизонта в сильнозакарстованных, трещиноватых карбонатных породах, расположенных в пределах плато Салем и Дрифтлесс (штат Иллинойс). В ходе исследования в 16 из 17 проб подземных вод обнаружен МП, средняя концентрация которого составила 6,4 шт/л. В исследовании австралийских ученых [Samandra et al., 2022] опробован аллювиальный водоносный горизонт месторождения Бахус (штат Виктория, Австралия), который сложен песками, гравием с прослоями глины и суглинка. Из 7 наблюдательных скважин с глубины от 2 до 29 м суммарно отобрана 21 проба. Средний размер выявленных частиц МП составил 89 мкм и варьировал от 18 до 491 мкм. Среднее количество частиц МП во всех пробах составило 38±8 шт/л, оно изменялось от 16 до 97 шт/л. Выявлены полиэтилен, полипропилен, полистирол и поливинилхлорид.

Процессы миграции МП изучали в аллювиальном водоносном горизонте при искусственном

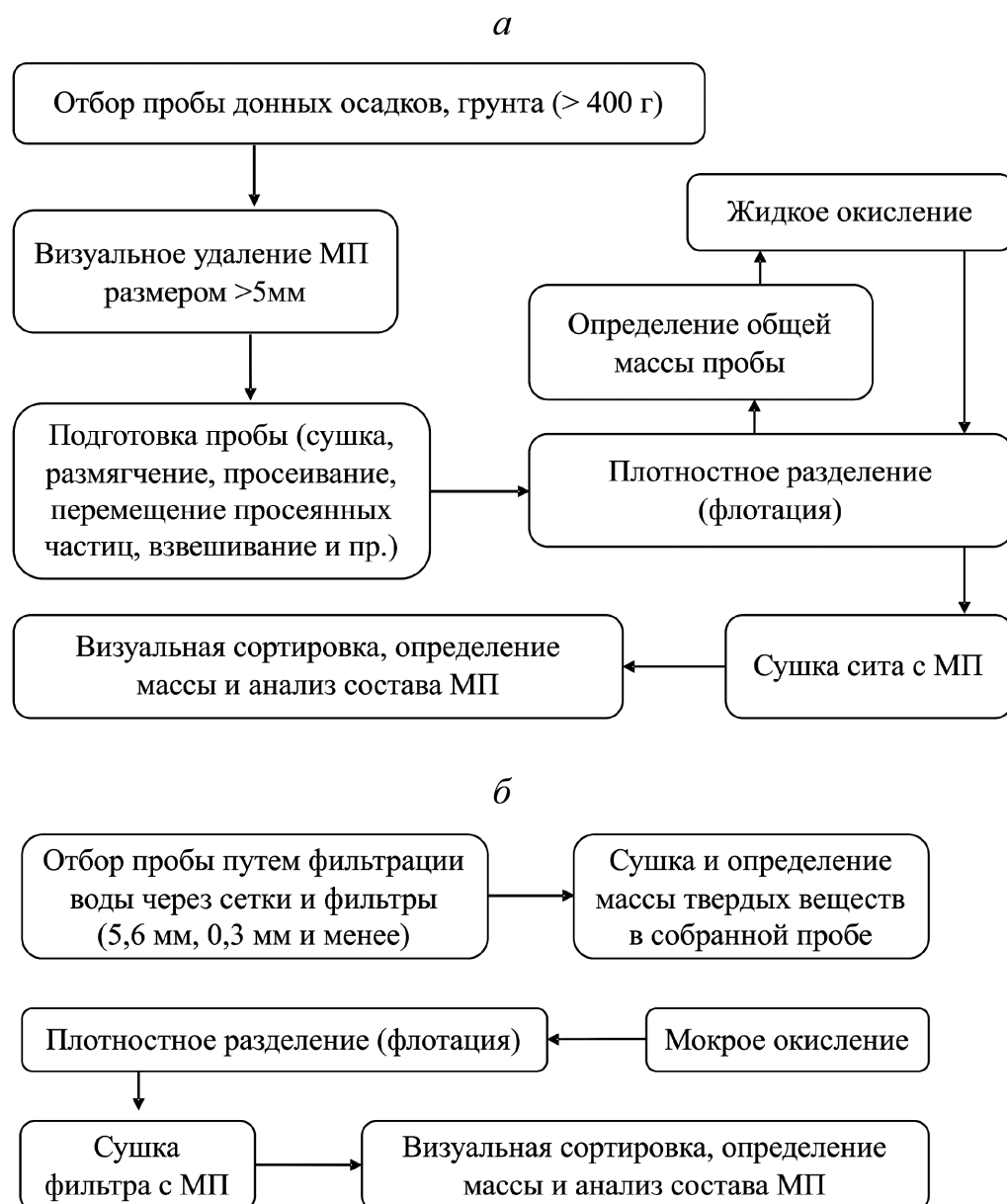
запуске частиц МП диаметром 1–5 мкм [Goeppert, Goldscheider, 2021]. Результаты исследования четко показывают возможность миграции МП в песчано-гравийных водоносных горизонтах, что доказывает актуальность изучения загрязнения МП и НП подземных вод.

МП также обнаружен в воде, прошедшей стадию очистки и водоподготовки. Ученые из Чехии опробовали пресную воду до и после очистки. МП был обнаружен во всех образцах, и его содержание варьировало от 1473 до 3605 шт/л в сырой воде и от 243 до 684 шт/л в очищенной воде [Казмирук, 2020], определены частицы МП размером до 1 мкм и установлено, что частицы размером до 10 мкм составляют 95%. В водопроводной воде Дании, отобранной непосредственно из кранов потребителей, концентрация частиц МП весьма незначительна [Strand et al., 2018]. Обнаруженные частицы представлены полиэтилентерефталатом, полипропиленом и полистиролом. Концентрация частиц МП в среднем составила до 0,8 шт/л.

По результатам анализа опубликованной литературы составлена обобщающая таблица (табл. 1) содержания МП в водных системах мира и РФ. При анализе данных этой таблицы видно, что диапазон концентрации МП в природных объектах очень широк, например, диапазон содержания в озерах МП составляет пять порядков, в реках — четыре порядка, при этом концентрация МП в донных отложениях практически во всех пробах существенно превышает соответствующие значения в воде (табл. 1). Различия в количественном содержании МП в водных объектах, а также в физико-химических характеристиках полимеров связаны, во-первых, с различными источниками загрязнения на урбанизированных, сельскохозяйственных и природных территориях; во-вторых, с разными природными факторами (ветровой режим, гидрологические и гидродинамические условия водных объектов); в-третьих, с разными методиками отбора проб.

Способы и проблемы определения микро- и нанопластика в природных водах. Анализ МП и НП из проб окружающей среды требует ряд подготовительных процедур, включающих разделение после отбора проб, очистку, идентификацию и количественную оценку. При этом применяются различные методы для отбора проб воды и донных осадков. Разработкой и тестированием методов отбора и подготовки проб поверхностной воды и донных отложений, созданием методики обнаружения в них МП занимаются многие научные группы [Cole et al., 2014; Hidalgo-Ruz et al., 2012; Masura et al., 2015; Nuelle et al., 2014; Strungaru et al., 2019; Zobkov et al., 2020]. Относительно опробования подземных вод каких-либо установленных рекомендаций пока нет, но в целом методика анализа МП и НП в подземных водах будет близка, а местами идентична с методиками для поверхностных вод.

Рис. 4. Общая схема анализа содержания микропластика: *a* — в пробе донных осадков, грунта, *б* — в пробе природной воды (составлена по данным [Cole et al., 2014; Hidalgo-Ruz et al., 2012; Masura et al., 2015; Nuelle et al., 2014; Strungaru et al., 2019])



Отбор проб донных осадков для дальнейшего анализа МП можно проводить дночерпателем, ударной трубкой и пр. В зависимости от задачи исследований можно выделить три основные стратегии отбора проб грунтов: выборочная, концентрирующая и полнообъемная [Zobkov et al., 2020]. Затем для анализа содержания МП в пробах донных осадков или грунтов выполняется их предварительная подготовка (рис. 4, *a*), включающая визуальное удаление МП размером >5 мм пинцетом, подготовка пробы (высушивание пробы, масса около 400 г), размягчение путем добавления, например метафосфата калия (5,5 г/л), сырое просеивание через сито (0,3 мм) и промывка просеянных твердых частиц дистиллированной водой, сушка (при 90 °С более 24 ч), определение массы твердых частиц, после чего частицы разделяют по плотности.

В качестве разделительной среды используются растворы с повышенной плотностью (например, раствор метавольфрамата лития (плотность

1,6 кг/л), поливольфрамата натрия (1,8 кг/л), NaCl (1,2 кг/л), NaI (1,8 кг/л), ZnCl₂ (1,6 кг/л), CaCl₂ (1,3 кг/л) и пр.) [Nuelle et al., 2014; Strungaru et al., 2019]. Затем МП и НП подвергаются жидкому окислению для химического очищения от лабильного органического вещества в растворах окислителей. В качестве таких растворов может выступать перекись водорода с катализатором Fe(II), кислоты (соляная, серная, азотная), гидроксид натрия (NaOH) и пр. При этом в работе [Nuelle et al., 2014] экспериментально показано, что наиболее эффективно использовать перекись водорода, в то время как кислотное разложение может разрушать или повреждать полимеры с низкой устойчивостью к pH (например, полиамид и полистирол), а 10 мМ NaOH при 60 °С может повреждать и обесцвечивать анализируемые частицы МП [Cole et al., 2014]. Поэтому использовать кислоты и гидроксид натрия нужно с осторожностью, чтобы избежать ошибок при анализе состава МП и НП. Погрешность анализа

МП в пробах донных отложений этим методом до 20% [Zobkov et al., 2020].

Анализ содержания и типов МП в поверхностных водах немного проще, чем в донных осадках [Masura et al., 2015; Zobkov et al., 2020]. Общую схему можно представить следующим образом (рис. 4, б). Сначала пробы отбирают путем фильтрации взвеси из природной воды с помощью специальной планктонной сетки или фильтра с разным размером пор (например, 6,5; 0,3 мм и пр.). Длительность сбора проб с поверхности воды составляет 15 мин. Пробы отбирают буксировкой сети Манта, однако время буксировки может быть уменьшено в случае, когда сетка забивается различным материалом (например, водорослями при их бурном цветении, плавающим мусором и пр.). Собранный материал высушивают и определяют массу твердых веществ в пробе. После этого твердые вещества подвергают мокрому окислению, например в среде перекиси водорода в присутствии катализатора Fe(II), для растворения лабильного органического вещества. При этом частицы МП остаются незатронутыми. Оставшиеся нерастворенные фрагменты подвергают плотностному разделению в специальных растворах, выделенный МП собирают на фильтре, сушат и анализируют.

Отметим, что для избежания загрязнения природных проб привнесенными МП и НП при отборе в поле и при их обработке в лаборатории необходимо очищать посуду (сита, пробирки, чашки и пр.) в ультразвуковой ванне от наличия частиц МП и НП перед применением, не использовать синтетическую одежду и пр.

Анализ МП и НП состоит из двух этапов: физическая характеристика отображаемых фрагментов, а затем химическая характеристика, подтверждающая химическую природу найденных частиц. Микроскопические методы (стерео-, флуоресценция, атомно-силовая, просвечивающая и сканирующая микроскопия) используются в основном для определения физических характеристик частиц, хотя некоторые из них позволяют определять и химический состав. Аналитические методы (спектроскопия и термический анализ) используются для определения химических свойств многих полимеров. Каждый из этих методов имеет свои достоинства, ограничения и недостатки (табл. 2). Отметим, что на данный момент не существует одного оптимального метода, и только их комплексирование позволяет наилучшим образом идентифицировать МП. Отдельно подчеркнем, что на сегодняшний день существуют сложности детектирования мелких частиц МП и НП, а работ, посвященных их распространению в природных водах, крайне мало. Таким образом, существует острая необходимость в улучшении методов анализа именно очень мелких частиц МП и НП. Кроме того, широкий спектр синтетических полимеров с разной химической структурой (алифатические, ароматические с функциональными группами или без них)

и с разным составом, а также наличие добавок или загрязнителей по-прежнему требуют особого подхода и могут создавать серьезные аналитические проблемы при определении.

Закключение. За последние несколько лет интерес к изучению загрязнения МП природных сред сильно возрос. Преимущественно изучение МП ведется в поверхностных водах, почвах, донных отложениях, а также в живых организмах. Как показывают результаты обзора, количество МП в природных водах сильно варьирует. В крупных реках России измеренное содержание полимеров изменяется на три порядка, от нескольких шт/м³ в русле Волги до сотни шт/м³ в верхнем течении р. Обь. В результате анализа опубликованной литературы установлено, что опробование поверхностных вод на территории Российской Федерации крайне неравномерно, наиболее изучены воды в центральной части России, практически отсутствуют данные о содержании МП в реках и озерах Западной и Восточной Сибири. Значительно более высокие значения концентрации МП обнаружены в донных отложениях рек, озер и морей, превышающие концентрацию полимеров в поверхностной воде на несколько порядков. Таким образом, донные осадки способны концентрировать значительное количество МП и НП, будучи поставщиком полимеров МП и НП и в подземные воды. Особенно остро эта проблема может встать для подземных вод береговых водозаборов, привлекающих поверхностную воду, которая захватывает с собой частицы НП из донных осадков и поставляет загрязнение к водозаборным скважинам и в дальнейшем к конечному потребителю.

Несмотря на то что с каждым годом появляется все больше данных о содержании МП в природных системах, методы, которые используются для его идентификации, до сих пор не стандартизированы. Также нет единого регламента по отбору, лабораторной подготовке проб, контролю для исключения вторичного загрязнения МП для дальнейшей идентификации МП. В связи со сложностью детектирования мелких частиц МП и НП работ, посвященных их распространению в природных водах, мало, поэтому существует острая необходимость в улучшении методов анализа именно очень мелких частиц МП и НП и их идентификации в различных пробах воды.

Анализ специальной литературы показывает, что количество частиц МП напрямую зависит от их размера: чем меньше размеры частиц, тем в большем количестве они обнаруживаются в образцах. В подземных водах концентрация частиц МП стремится к минимальным значениям, что связано с трудностью и длительностью пути миграции МП с поверхности в водоносные горизонты, с размерами пор водоносного горизонта, процессами сорбции и пр. На сегодняшний день известны единичные публикации, в которых изложены результаты исследования содержания МП в подземных водах. Изучение загрязнения МП подземных вод на

Таблица 2

Основные методы определения количества и состава микропластика в природных водах (составлена по данным [Cole et al., 2014; Hidalgo-Ruz et al., 2012; Masura et al., 2015; Nuelle et al., 2014; Strungaru et al., 2019; Zobkov et al., 2020])

Тип анализа	Визуальное детектирование / микроскопические методы	Аналитические методы		
Название методов	Стереомикроскопия, флуоресценция, атомно-силовая, просвечивающая и сканирующая микроскопия	Инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье (FTIR)	Рамановская спектроскопия	Термический анализ (дифференциальная сканирующая калориметрия (DSC), термогравиметрия (TGA), пиролизическая газовая хромато-масс-спектрометрия (Py-GC-MS))
Суть метода	Идентификация МП на основе их внешнего вида: формы, размера и цвета частиц	Метод основан на микроскопическом взаимодействии инфракрасного света с химическим веществом посредством процесса поглощения, дает набор диапазонов, называемый спектром, который уникален для каждого химического вещества	Основана на явлении неупругого рассеяния оптического излучения на молекулах вещества, при котором происходит существенное изменение длины волны излучения, что позволяет идентифицировать различные материалы, имеющие один и тот же состав	Количественная оценка свойства материалов в зависимости от контролируемого изменения температуры. Идентификация МП проводится в соответствии с продуктами его распада
Размер частиц для анализа	Частицы до 100 мкм различимы, но их невозможно однозначно идентифицировать как МП	Размер МП до 1–2 мм, толщина <100 мкм	Размер МП до 1 мкм. Нет ограничений по толщине или форме анализируемого образца	Не зависит от размера и формы частиц МП. Для Py-GC-MS: минимальный размер частиц 100 мкм; предел обнаружения: от $1 \cdot 10^{-9}$ до 1 мг
Достоинства	1. Возможность классифицировать пластиковые частицы по размеру, цвету и форме, что позволяет сделать вывод о их происхождении. 2. Доступность анализа (возможность использовать в полевых условиях) и дешевизна. 3. Высокое качество SEM-изображений. 4. Не разрушает образец в процессе определения	1. Достаточно точный анализ. 2. Хорошо детектируются алифатические соединения и сложные полиэфиры. 3. Не разрушает образец в процессе определения	1. Необходима минимальная подготовка образца. 2. Можно получить информацию о химическом составе пластика и содержащихся в нем органических и неорганических наполнителях, пигментах, красителях и пр. 3. Хорошо определяет алифатические и ароматические соединения. 4. Возможен анализ образцов в растворе, газе, пленке, поверхности, твердых телах и монокристаллах. 5. Позволяет визуально выбрать определенную область/часть образца для анализа	1. Не требует предварительной обработки образца. 2. Возможность охарактеризовать полимеры и добавки, присутствующие в образце. 3. Сокращение времени и стоимости анализа по сравнению с другими методами с экстракцией растворителями. 4. Биообрастание, загрязняющие вещества или добавки не препятствуют идентификации и количественному определению типов полимеров. 5. Возможность анализировать образец массой до 100 мг (TGA)
Недостатки/ограничения	1. Субъективный анализ, что приводит к большим различиям результатов между наблюдателями (60–100%). 2. Высокие временные затраты на анализ, трудоемок. 3. Ошибочная классификация других материалов как пластиков. 4. Необходимость предварительной пробоподготовки. 5. Сложно использовать в качестве потокового анализа. 6. Высокая ошибка определения (20–70%)	1. Загрязняющие вещества и примеси мешают определению. 2. Высокая стоимость оборудования. 3. Одиночное определение требует много усилий со стороны оператора и редко используется при анализе сложных образцов. 4. Требуется временных затрат на определение	1. Необходимо продолжительное измерение для избежания слабых сигналов, трудоемкость измерения. 2. Интерференция флуоресценции, зависящей от характеристик материала, таких, как цвет, биообрастание и деградация. 3. Разрушение полимеров в процессе измерения. 4. Высокая стоимость оборудования	1. Деструкция образцов в ходе анализа. 2. Не дает информацию о размере и форме частиц

территории России не выполнялось. С течением времени проблема пластикового и, соответственно, микропластикового загрязнения усугубится и, не имея определенных знаний и фактических данных о точной концентрации частиц МП и концентрации

сопутствующих ему загрязнителей, невозможно найти пути ее разрешения и методы эффективной очистки вод. Поэтому необходимо интенсифицировать исследования, направленные на изучение геохимии МП в подземных водах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Блиновская Я.Ю., Якименко А.Л. Анализ загрязнения акватории залива Петра Великого (Японского моря) микропластиком // Успехи современного естествознания. 2018. № 1. С. 68–73.
- Ершова А.А., Еремина Т.Р., Дунаев А.Л. и др. Исследование загрязнения микропластиком морей российской Арктики и Дальнего Востока // Арктика: экология и экономика. 2021. Вып. 11, № 2. С. 164–177.
- Ильина О.В., Колобов М.Ю., Ильинский В.В. Пластиковое загрязнение прибрежных поверхностных вод среднего и южного Байкала // Водные ресурсы. 2021. Вып. 48. С. 42–51.
- Казмирук В.Д. Микропластик в окружающей среде. Нарастающая проблема планетарного масштаба. М.: Ленанд, 2020.
- Козловский Н.В., Блиновская Я.Ю. Микропластик — макропроблема Мирового океана // Междунар. журн. прикладных и фундаментальных исследований. 2015. Вып. 10. № 1. С. 159–162.
- Поздняков Ш.Р., Иванова Е.В., Гузева А.В. и др. Исследование содержания частиц микропластика в воде, донных отложениях и грунтах прибрежной территории Невской губы Финского залива // Водные ресурсы. 2020. Вып. 47. № 4. С. 411–420.
- Румянцев В.А., Поздняков Ш.Р., Крюков Л.Н. К вопросу о проблеме микропластика в континентальных водоемах // Российский журн. прикладной экологии. 2019. № 2. С. 60–64.
- Bagaev A., Khatmullina L., Chubarenko I. Anthropogenic microlitter in the Baltic Sea water column // Marine Pollution Bull. 2018. Vol. 129. P. 918–923.
- Balestra V., Bellopede R. Microplastic pollution in show cave sediments: First evidence and detection technique // Environ. Pollution. 2022. Vol. 292. 118261.
- Bergmann M., Mützel S., Primpke S. et al. White and wonderful? Microplastics prevail in snow from the Alps to the Arctic // Sci. Advances. 2019. N 5. eaax 1157.
- Bouwman H., Minnaar K., Bezuidenhout C., Verster C. Microplastics in freshwater environments // Water Resources Commission, North West University. 2018. 85 p.
- Browne M.A., Galloway T., Thompson R. Microplastic — an emerging contaminant of potential concern? // Integer Environ Assess Manag. 2007. N 3. P. 559–561.
- Cole M., Lindeque P., Halsband C., Galloway T.S. Microplastics as contaminants in the marine environment: A review // Marine Pollution Bull. 2011. Vol. 62. P. 2588–2597.
- Cole M., Webb H., Lindeque P.K. et al. Isolation of microplastics in biota-rich seawater samples and marine organisms // Sci. Rep. 2014. Vol. 4. 4528.
- Derraik J.G.B. The pollution of the marine environment by plastic debris: a review // Marine Pollution Bull. 2002. Vol. 44. P. 842–852.
- Efimova I., Bagaeva M., Bagaev A. et al. Secondary microplastics generation in the Sea Swash Zone With Coarse Bottom sediments: Laboratory experiments // Frontiers in Marine Sci. 2018. N 5. 313.
- Esiukova E., Zobkov M., Chubarenko I. Data on microplastic contamination of the Baltic Sea bottom sediment samples in 2015–2016 // Data in Brief. 2020. Vol. 28. 104887.
- Frank Y.A., Vorobiev D.S., Kayler O.A. et al. Evidence for microplastics contamination of the remote tributary of the Yenisei river, Siberia — the pilot study results // Water. 2021. Vol. 13. 3248.
- Frank Y.A., Vorobiev E.D., Vorobiev D.S. Preliminary screening for microplastic concentrations in the surface water of the Ob and Tom rivers in Siberia, Russia // Sustainability. 2018. Vol. 13. 80.
- Frei S., Piehl S., Gilfedder B.S. et al. Occurrence of microplastics in the hyporheic zone of rivers // Sci. Rep. 2019. Vol. 9. 15256.
- Geyer R., Jambeck J.R., Law K.L. Production, use, and fate of all plastics ever made // Sci. Advances. 2017. Vol. 3. e1700782.
- Goeppert N., Goldscheider N. Experimental field evidence for transport of microplastic tracers over large distances in an alluvial aquifer // J. Hazardous Materials. 2021. Vol. 408. 124844.
- Graham E.R., Thompson J.T. Deposit- and suspension-feeding sea cucumbers (Echinodermata) ingest plastic fragments // J. Experimental Marine Biology and Ecology. 2009. Vol. 368. P. 22–29.
- Hidalgo-Ruz V., Gutow L., Thompson R.C., Thiel M. Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification // Environmental Sci. & Technology. 2012. Vol. 46. P. 3060–3075.
- Huang J., Chen H., Zheng Y. et al. Microplastic pollution in soils and groundwater: Characteristics, analytical methods and impacts // Chem. Engineering J. 2021. Vol. 425. 131870.
- Hurley R., Woodward J., Rothwell J.J. Microplastic contamination of river beds significantly reduced by catchment-wide flooding // Nature Geosci. 2018. Vol. 11. P. 251–257.
- Kane I.A., Clare M.A. Dispersion, accumulation, and the ultimate fate of microplastics in deep-marine environments: A review and future directions // Frontiers in Earth Sci. 2019. Vol. 7. 80.
- Karbalaei S., Hanachi P., Walker T.R., Cole M. Occurrence, sources, human health impacts and mitigation of microplastic pollution // Envir. Sci. and Pollution Res. 2018. Vol. 25. P. 36046–36063.
- Koelmans A.A., Mohamed Nor N.H., Hermesen E. et al. Microplastics in freshwaters and drinking water: Critical review and assessment of data quality // Water Res. 2019. Vol. 155. P. 410–422.
- Lisina A.A., Platonov M.M., Lomakov O.I. et al. Microplastic abundance in Volga River: results of a pilot study in Summer 2020 // Geography, Environment, Sustainability. 2020. Vol. 14. P. 82–93.
- Maes T., Van der Meulen M.D., Devriese L.I. et al. Microplastics baseline surveys at the water surface and in sediments of the North-East Atlantic // Frontiers in Marine Sci. 2017. Vol. 4. 135.
- Malygina N., Mitrofanova E., Kuryatnikova N. et al. Microplastic pollution in the surface waters from plain and

mountainous lakes in Siberia, Russia // *Water*. 2021. Vol. 13. 2287.

Masura J., Baker J., Foster G., Arthur C. Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments // NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-48. U.S. Department of Commerce. 2015. 31 p.

Mukhanov V.S., Litvinyuk D.A., Sakhon E.G. et al. A new method for analyzing microplastic particle size distribution in marine environmental samples // *Ecologica Montenegrina*. 2019. Vol. 23. P. 77–86.

Ng K.L., Obbard J.P. Prevalence of microplastics in Singapore's coastal marine environment // *Marine Pollution Bull.* 2006. Vol. 52. P. 761–767.

Nuelle M.-T., Dekiff J.H., Remy D., Fries E. A new analytical approach for monitoring microplastics in marine sediments // *Environ. Pollution*. 2014. Vol. 184. P. 161–169.

Panno S.V., Kelly W.R., Scott J. Microplastic contamination in karst groundwater systems // *Groundwater*. 2019. Vol. 57. P. 189–196.

Peng Y., Wu P., Schartup A.T., Zhang Y. Plastic waste release caused by COVID-19 and its fate in the global ocean // *Proceed. of the National Academy of Sciences*. 2019. Vol. 118. e2111530118.

Re V. Shedding light on the invisible: addressing the potential for groundwater contamination by plastic microfibers // *Hydrogeology J.* 2019. Vol. 27. P. 2719–2727.

Ryan P.G., Moore C.J., van Franeker J.A., Moloney C.L. Monitoring the abundance of plastic debris in the marine environment // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biol. Sci.* 2009. Vol. 364. P. 1999–2012.

Samandra S., Johnston J.M., Jaeger J.E. et al. Microplastic contamination of an unconfined groundwater aquifer in Victoria, Australia // *Sci. Total Environment*. 2022. Vol. 802. 149727.

Strand J., Feld L., Murphy F. et al. Analysis of microplastic particles in Danish drinking water // Aarhus University. DCE — Danish Centre for Environment and Energy, Aarhus University. 2018. 34 p.

Strungaru S.-A., Jijie R., Nicoara M. et al. Micro- (nano) plastics in freshwater ecosystems: Abundance, toxicological impact and quantification methodology // *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2019. Vol. 110. P. 116–128.

Thompson R.C., Olsen Y., Mitchell R.P. et al. Lost at Sea: Where Is All the Plastic? // *Science*. 2004. Vol. 304. P. 838–838.

Triebkorn R., Braunbeck T., Grummt T. et al. Relevance of nano- and microplastics for freshwater ecosystems. A critical review // *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2019. Vol. 110. P. 375–392.

Verla A.W., Enyoh C.E., Verla E.N., Nwornorh K.O. Microplastic-toxic chemical interaction: a review study on quantified levels, mechanism and implication // *SN Applied Sciences*. 2019. № 1. 1400.

Wang W., Yuan W., Chen Y., Wang J. Microplastics in surface waters of Dongting Lake and Hong Lake, China // *Sci. of Total Environment*. 2018. Vol. 633. P. 539–545.

Zhou C., Bi R., Su C. et al. The emerging issue of microplastics in marine environment: A bibliometric analysis from 2004 to 2020 // *Marine Pollution Bull.* 2022. Vol. 179. 113712.

Zobkov M., Belkina N., Kovalevski V. et al. Microplastic abundance and accumulation behavior in Lake Onego sediments: a journey from the river mouth to pelagic waters of the large boreal lake // *Environmental Chemical Engineering*. 2020. Vol. 8. 104367.

Zobkov M., Esiukova E. Microplastics in Baltic bottom sediments: Quantification procedures and first results // *Marine Pollution Bull.* 2017. Vol. 114. P. 724–732.

Статья поступила в редакцию 06.06.2022,
одобрена после рецензирования 08.06.2022,
принята к публикации 26.01.2023