

УДК 504.05

ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ЧАСТИЦ МИКРОПЛАСТИКА В ЛАДОЖСКОМ ОЗЕРЕ

Е. В. Иванова*, **Д. А. Тихонова**

*Институт озераедения РАН, СПб ФИЦ РАН (ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105), *spb.spt@mail.ru*

Представлены результаты исследования содержания микропластика в поверхностном слое водной толщи и в донных отложениях Ладожского озера. Отбор проб, их подготовка и анализ проводились в период 2018–2021 гг. Для подготовки проб донных отложений использовалась модифицированная многостадийная методика NOAA, включающая плотностное отделение частиц микропластика от минеральной составляющей и пероксидное окисление органического вещества. Для идентификации формы, размера и цвета частиц микропластика использовался оптический микроскоп. Химический анализ исследуемых частиц проводился при помощи метода рамановской спектроскопии. Частицы микропластика присутствовали во всех исследованных пробах воды и донных отложений. Наиболее высокое его содержание зафиксировано вблизи городских поселений (Приозерск и Сортавала) и промышленных территорий (целлюлозный завод в городе Питкяранта). Также повышенное содержание микропластика наблюдается в местах впадения некоторых рек (Вуокса, Янисйоки). Среди обнаруженных частиц микропластика по форме в значительной степени преобладают волокна (98 %). Диапазон анализируемых частиц – 60–5000 мкм. Наибольшее количество частиц микропластика зафиксировано в диапазоне от 60 до 1000 мкм (61 %). Далее количество частиц уменьшается с увеличением их размера. Не обнаружено статистически значимой корреляции между гранулометрическим составом донных отложений и концентрациями микропластиковых частиц в исследуемых грунтах. Спектральный анализ химического состава частиц показал, что наиболее часто встречающимся типом микропластика в Ладожском озере является полиэтилен-терефталат, а также были обнаружены частицы полиакрилатов, полипропилена и полиэтилена.

Ключевые слова: загрязнение микропластиком; Ладога; пресноводные объекты; донные отложения; поверхностный слой водной толщи

Для цитирования: Иванова Е. В., Тихонова Д. А. Оценка содержания частиц микропластика в Ладожском озере // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 6. С. 58–67. doi: 10.17076/lim1582

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН по теме № FMNG-2019-0003 «Разработка комплексных методов исследования и оценки характеристик твердых частиц в наномасштабном диапазоне размеров в водных объектах с различной степенью антропогенной нагрузки».

E. V. Ivanova*, D. A. Tikhonova. ESTIMATION OF MICROPLASTIC CONTENT IN LAKE LADOGA

*Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences (9 Sevastyanova St., 196105 St. Petersburg, Russia), *spb.spt@mail.ru*

This paper presents the results of a study on microplastics content variation in the surface layer of the water column and in the sediments of Lake Ladoga. The sampling, processing and analysis were carried out in 2018–2021. The modified NOAA method involving density separation of microplastics from mineral matter and peroxide oxidation of organic matter was applied to extract microplastics from sediment samples. An optical microscope was used to identify the shape, size, and colour of microplastic particles. The chemical analysis of the particles was carried out using Raman spectroscopy. Microplastic particles were detected in all the samples examined. The highest content of microplastics was observed near urban areas (Priozersk and Sortavala), industrial areas (pulp mill in Pitkyaranta), and at the inflow of two rivers (the Vuoksi, the Jänisjoki). Speaking of shape, fibers prevailed (98 %). The size range of the particles was 60–5000 µm. The most abundant size fraction of microplastic particles was 60–1000 µm (61 %), the numbers of particles decreased with increasing of their size. No statistically significant correlation was found between the particle-size composition of sediments and the abundance of microplastic particles in these sediments. Spectral analysis of the chemical composition of the particles showed that the most common type of microplastics in Lake Ladoga was polyethylene terephthalate; other types were polyacrylate, polypropylene, and polyethylene.

Keywords: microplastic pollution; Ladoga; freshwater bodies; sediments; surface layer of the water column

For citation: Ivanova E. V., Tikhonova D. A. Estimation of microplastic content in Lake Ladoga. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022. No. 6. P. 58–67. doi: 10.17076/lim1582

Funding. The study was carried out under state assignment to the Institute of Limnology RAS – St. Petersburg Research Centre RAS within theme #FMNG-2019-0003 “Development of integrated methods for the study and assessment of the characteristics of solid particles in the nano scale size range in waters exposed to different degrees of anthropogenic pressure”.

Введение

В связи с глобальным ростом производства пластика, его повсеместным использованием и зачастую неправильной утилизацией большое количество пластиковых предметов оказывается в окружающей среде. В естественных условиях пластик не разлагается, а распадается на мелкие фрагменты. В водные объекты микропластик попадает с поверхностным стоком, с хозяйственно-бытовыми стоками, со сточными водами промышленных и водоочистных сооружений, в результате активного рекреационного использования территорий, а также рыболовства (деградации рыболовных сетей и других орудий лова) [Andrady, 2011].

В последние годы активно развиваются исследования в области оценки загрязнения водных объектов микропластиком. В Российской Федерации исследования проводятся на таких озерах, как Ладожское [Ivanova et al., 2021], Онежское [Zobkov et al., 2020; Zobkov

и др., 2021], Байкал [Karnaukhov et al., 2020; Ильина и др., 2021], на сибирских озерах [Malygina et al., 2021], на реках – Енисей, Обь, Томь [Frank et al., 2021a, b], Волга [Lisina et al., 2021], в Финском заливе [Pozdnyakov et al., 2020], Балтийском море [Zobkov et al., 2017; Есюкова, Чубаренко, 2019], заливе Петра Великого (Японское море) [Блиновская, Якименко, 2018], арктических морях [Ershova et al., 2021; Ершова и др., 2021] и других водных объектах.

Институт озероведения РАН – СПб ФИЦ РАН проводит исследования содержания частиц микропластика в Ладожском озере с 2018 года. Целью исследований является определение уровня загрязнения донных отложений и поверхностного слоя воды Ладожского озера микропластиком. Ладожское озеро имеет большое значение для хозяйственной деятельности Ленинградской области и Республики Карелия. Экологическое состояние Ладоги оказывает прямое влияние на качество водоснабжения

Санкт-Петербурга. Озеро является крупнейшим источником водных, пищевых и рекреационных ресурсов региона [Ладожское..., 2015]. Важность исследований микропластика в водных объектах определяется его потенциальной опасностью для живых существ. Многочисленные исследования подтверждают, что частицы пластика могут передаваться по пищевым цепям и негативно влиять на жизнедеятельность организмов [De Sá et al., 2018; Campanale et al., 2020; Yuan et al., 2022].

Материалы и методы

Отбор проб

Пробы воды и донных отложений отбирались в 2018–2021 годах с борта научно-исследовательских судов «Эколог» и «Посейдон». Отобрано по две пробы донных отложений в 24 точках (7 точек в июне 2018 г., 12 – в сентябре 2019 г., 3 – в октябре 2020 г. и 2 – в июне 2021 г.) и по две пробы поверхностного слоя воды в 15 точках (11 точек в октябре 2020 г., 3 – в июне 2021 г. и 1 – в октябре 2021 г.).

Пробы воды отбирались с поверхностного слоя с помощью специальной фильтрационной установки, разработанной в Институте озераведения [Поздняков и др., 2021]. Фильтрационная установка позволяет проводить отбор проб воды с различных глубин при помощи насоса. От 100 до 1000 литров воды (в зависимости от количества взвеси и планктона) прокачивалось через металлическую сетку с ячейкой 60 мкм. Объем воды фиксировался при помощи электронного счетчика.

Пробы донных отложений отбирались дночерпателем Экмана – Берджа с поверхностного слоя грунта толщиной 5–10 см, после чего при помощи металлической ложки помещались в стеклянные банки и хранились в холодильнике до этапа пробообработки.

Методы обработки проб

Пробы воды. Для растворения органической взвеси пробы воды смывались с сетки в стеклянную колбу, куда добавлялся реактив Фентона (30% раствор перекиси водорода и Fe(II) катализатор, приготовленный по методу NOAA [Masura et al., 2015]). Далее пробы выдерживались на водяной бане при температуре 75 °С в течение 40–60 минут в зависимости от количества органического материала, после чего отстаивались в течение суток. После растворения органического материала пробы фильтровались на металлическую сетку

с размером ячеек 60 мкм. Полученный осадок смывался дистиллированной водой на чашку Петри, чашка накрывалась металлической сеткой и оставлялась при комнатной температуре до полного испарения жидкости, после чего пробы анализировались под микроскопом. Если проба визуально содержала небольшое количество органического материала, она сразу смывалась с сетки на чашку Петри, высушивалась описанным выше способом и затем анализировалась под микроскопом. Для каждой станции отбора было проанализировано по две пробы воды и среднее значение между двумя пробами фиксировалось как результат для данной точки.

Пробы донных отложений. Гранулометрический состав проб донных отложений определялся по методу Качинского [1958]. Полученные результаты сопоставлялись с результатами проводимых ранее исследований, представленных на карте распределения донных отложений Ладожского озера [Ладожское..., 2015].

Для подготовки проб донных отложений к анализу использовалась методика NOAA [Masura et al., 2015]. В методику были внесены некоторые изменения: в частности, вместо раствора NaCl (1,2 г/см³) для отстаивания отложений использовался раствор ZnCl₂ в связи с его более высокой плотностью (1,7 г/см³). Данный раствор считается более эффективным для экстракции частиц микропластика с большей плотностью [Sorrock et al., 2017]. Также для фильтрации использовалась сетка с мелкой ячейкой (60 мкм) для возможности удержания более мелких частиц.

Перед отстаиванием пробы подсушивались в сушильном шкафу при температуре 55 °С для удаления излишней влаги. После чего 10 г исследуемой пробы высушивались при температуре 105 °С для определения абсолютно сухого веса и последующего пересчета содержания частиц микропластика на сухой вес. Подсушенная проба (400 г) дважды отстаивалась в 55% растворе ZnCl₂ в течение суток. Далее профильтровывалась вся надосадочная жидкость, как предложено в других работах [Zobkov, Esiukova, 2017]. Жидкость фильтровалась через металлическую сетку с размером ячеек 60 мкм. Осажденный на сетке материал смывался дистиллированной водой в колбу и смешивался в пропорциях 1:1 с реактивом Фентона для растворения органического материала. Проба выдерживалась на водяной бане при 75 °С в течение 40–60 минут в зависимости от количества органического материала, после чего отстаивалась в течение суток

по аналогии с исследованием микропластика в Балтийском море [Zobkov, Esiukova, 2017]. Далее проба снова фильтровалась через металлическую сетку с ячейкой 60 мкм. Осадок с сетки смывался раствором NaCl в стеклянный стакан, после чего разливался по пробиркам для повторного плотностного отделения в центрифуге. Центрифугирование проводилось в течение 3 минут на скорости 3000 оборотов в минуту. После центрифугирования надосадочная жидкость повторно фильтровалась через металлическую сетку, осажденные на сетке частицы тщательно промывались дистиллированной водой для удаления остатков соли и смывались на чашку Петри. Чашка накрывалась металлической сеткой и оставлялась при комнатной температуре до полного испарения жидкости. Для каждой станции отбора также было проанализировано по две пробы донных отложений, и среднее значение между двумя пробами фиксировалось как результат для данной точки.

Идентификация частиц микропластика

Идентификация частиц микропластика выполнялась в два этапа. На первом этапе проводился визуальный анализ частиц в диапазоне от 60 до 5000 мкм при помощи оптического микроскопа Euler Professor 770T с увеличением 40x и 100x для определения формы, размера и цвета частиц. Нижняя граница 60 мкм в определяемом размере частиц обусловлена размером сетки-фильтра. Частицы размером 60–100 мкм анализировались при увеличении 100x. Частицы размером более 100 мкм в основном анализировались при увеличении 40x. Для визуального определения микропластика использовались общепринятые критерии: отсутствие клеточной структуры, единообразная толщина и цвет частиц [Guide..., 2015].

После предварительной идентификации на оптическом микроскопе проводился анализ химического состава частиц с помощью рамановского спектрометра Horiba Jobin-Yvon LabRam HR800. Для идентификации состава частиц использовалась библиотека Horiba JY Raman Library FORENSIC V2. Результат принимался при совпадении спектров от 70 %. Анализ проводился для наиболее подходящих по размеру частиц – крупных волокон и фрагментов.

Контроль внешнего загрязнения

Для предотвращения внешнего загрязнения при лабораторной подготовке проб по возможности исключалось применение пластиковых

предметов и синтетических тканей. Анализы выполнялись в специальной одежде, перчатках, с использованием стеклянной посуды и металлических сеток. Перед началом анализа раствор ZnCl₂ дополнительно фильтровался, а посуда и фильтры тщательно промывались дистиллированной водой.

На этапе подготовки проб для анализа осуществлялся контроль внешнего загрязнения. Параллельно с основными пробами проводился анализ холостых проб (по одной холостой пробе для каждой двух проб, отобранных в одной точке). Для холостых проб воды использовалась дистиллированная вода, для холостых проб донных отложений – раствор ZnCl₂. Проба с дистиллированной водой / раствором ZnCl₂ обрабатывалась аналогично основным пробам. При анализе холостой пробы подсчитывались частицы, попадающие в образец в результате побочного загрязнения.

Статистический анализ

Для оценки значимости различий между содержанием микропластика в песчаных и илистых пробах использовался U-критерий Манна – Уитни. Расчеты проводились в программе Microsoft Excel 2016.

Результаты

Контроль внешнего загрязнения

Доля внешнего загрязнения составила 0–15 % от общего количества частиц микропластика в пробах. В холостых пробах в небольших количествах были найдены волокна. Процент побочной контаминации вычитался из полученного количества частиц микропластика в основных пробах.

В нескольких исследуемых пробах воды с разных точек отбора были обнаружены одинаковые синие и зеленые фрагменты, визуально идентифицированные как краска с научно-исследовательского судна. Данные частицы не учитывались при оценке содержания микропластика в пробах.

Содержание микропластика в поверхностном слое водной толщи

В пробах воды, отобранных на акватории Ладожского озера, суммарно обнаружено 292 частицы микропластика. На рис. 1 представлены результаты анализа содержания микропластика в пробах из поверхностно-

го слоя водной толщи в частицах на м³. Наиболее высокие значения содержания микропластика зафиксированы в местах впадения некоторых рек (Янисйоки и Вуоксы) – 144 и 109 частиц/м³ и вблизи городских территорий (Приозерск) – 160 частиц/м³, а также возле завода в г. Питкяранта – 353 частицы/м³. Среднее содержание микропластика в поверхностном слое водной толщи Ладожского озера – 83 ± 86 частиц/м³.

Содержание микропластика в донных отложениях

В пробах донных отложений Ладожского озера суммарно обнаружено 419 частиц микропластика. На рис. 2 представлены результаты анализа содержания частиц микропластика в частицах на кг сухого веса донных отложений. Наибольшее содержание микропластика обнаружено вблизи города Питкяранта (90 частиц/кг сухого веса) и вблизи шхерных районов северной части Ладожского озера (51–53 частиц/кг сухого веса). Наименьшее содержание наблюдается в юго-западной части озера (8–17 частиц/кг сухого веса) (рис. 2). Среднее содержание микропластика в донных отложениях Ладожского озера составило 30 ± 18 частиц/кг сухого веса.

В озере не наблюдается значимой корреляции между концентрациями частиц микропластика и гранулометрическим составом донных отложений (песок/ил). U-критерий Манна – Уитни подтвердил отсутствие значимых различий между выборками: U = 93,5 (U_{кр} = 34, уровень значимости 0,05). Средние концентрации в илистых отложениях составляют 38 ± 24, а в песках 25 ± 11 частиц/кг сухого веса. По всей видимости, в данном случае решающее значение оказывают другие факторы (течения и источники антропогенного загрязнения).

По форме частиц в воде и донных отложениях значительно преобладают волокна. По цвету волокон преобладают прозрачные, красные и синие нити, реже встречаются черные, зеленые и серые. Фрагменты и пленки встречаются крайне редко (рис. 3).

Количество частиц микропластика в воде и донных отложениях увеличивается с уменьшением их размера (рис. 4). Результаты исследования показывают, что наибольшее количество частиц (61 %) находится в диапазоне 60–1000 мкм.

Идентификация частиц по химическому составу проводилась преимущественно для



Рис. 1. Содержание микропластика в поверхностном слое водной толщи Ладожского озера (частиц/м³)

Fig. 1. Content of microplastics in the surface layer of the water column in Lake Ladoga (particles/m³)

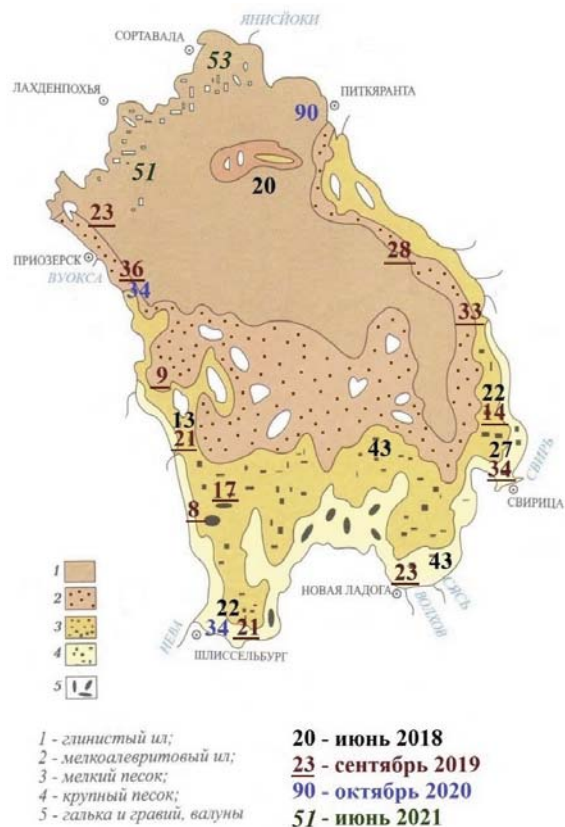


Рис. 2. Содержание микропластика в донных отложениях Ладожского озера (частиц/кг сухого веса)

Fig. 2. Content of microplastics in the sediments of Lake Ladoga (particles/kg dry weight)

более крупных частиц (> 500 мкм) в связи с определенными сложностями при анализе мелких нитей при помощи рамановской спектроскопии, в частности, прожигании лазером тонких волокон. Химический состав был верифицирован для 20 % от всех ис-

следуемых частиц пластика. Наиболее часто встречающимся типом пластика в Ладожском озере оказался полиэтилентерефталат (46 %). Также обнаружены частицы полиакрилатов (31 %), полипропилена (15 %) и полиэтилена (8 %).

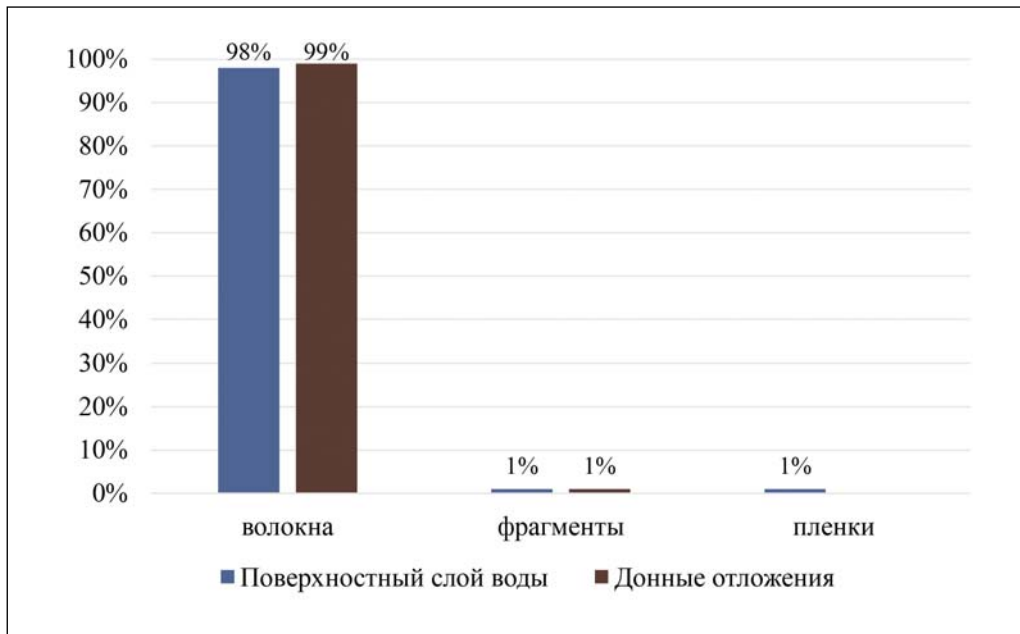


Рис. 3. Распределение микропластика в воде и донных отложениях Ладожского озера по форме частиц

Fig. 3. Distribution of microplastics in the water and sediments of Lake Ladoga by shape

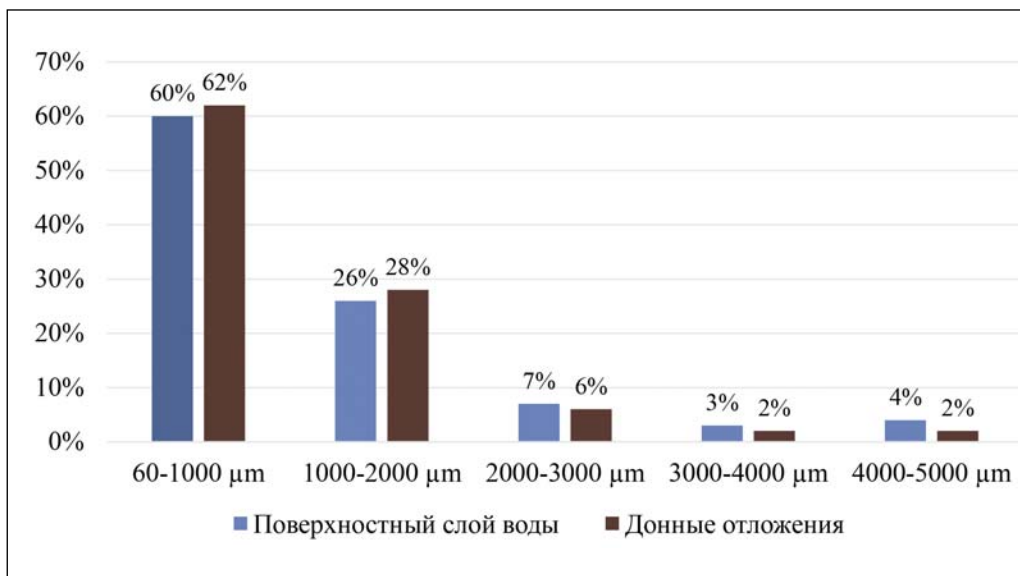


Рис. 4. Распределение частиц микропластика в воде и донных отложениях Ладожского озера по размеру

Fig. 4. Distribution of microplastics in Lake Ladoga by size

Обсуждение результатов

В настоящее время не существует утвержденной универсальной методики отбора и лабораторной подготовки проб воды и донных отложений для последующего анализа частиц микропластика, в связи с чем сравнение результатов исследований различных научных групп вызывает некоторые затруднения. Различаются методы отбора, пробоподготовки, размеры ячеей используемой фильтр-сетки, единицы измерения. Так, у сетей Манта и нейстонных сетей, используемых для отбора проб воды с судна, размер ячеей сетки обычно ≥ 300 мкм [Dusaucy et al., 2021]. Сети улавливают более крупные частицы, которые реже встречаются в водной толще. Однако они позволяют произвести отбор проб воды с обширной территории. Насосные системы в свою очередь удерживают более мелкие частицы за счет меньшего размера ячеей сетки [Tamminga et al., 2019; Karlsson et al., 2020]. Различные единицы измерения содержания частиц микропластика на объем воды (литр, м³, км³) и площадь (км²) также затрудняют сравнение полученных результатов.

В пробах воды, отобранных методом траления нейстонной сети на озере Байкал, зафиксировано значительно меньшее содержание частиц микропластика, чем в Ладожском озере (1 частица/м³) [Karnaukhov et al., 2020]. В озере Каллавеси в Финляндии среднее содержание частиц микропластика в пробах, отобранных сетями Манта, также значительно ниже полученного в Ладожском озере ($0,27 \pm 0,18$ частиц/м³), однако содержание микропластика в пробах, отобранных при помощи насосной системы (12 ± 17 частиц/м³ при размере ячеей сетки 100 мкм и 155 ± 73 частиц/м³ при размере ячеей сетки 20 мкм) [Urasjärvi et al., 2020], приближено к его содержанию в Ладоге. В обзоре исследований загрязнения микропластиком 98 мировых озер приводится диапазон значений содержания микропластика в поверхностном слое водной толщи – от 0,27 до 34 000 частиц/м³ с медианой в 1442 частицы/м³ [Dusaucy et al., 2021]. Таким образом, полученное содержание микропластика в воде может отличаться в зависимости от используемых методов его определения.

Методы лабораторной обработки проб донных отложений также имеют значительные отличия: различаются способы плотностного отделения частиц микропластика от минерального вещества (различны как растворы, так и оборудование), размеры сетки-фильтра (20–333 мкм), объем исследуемой пробы (50–400 г) и др.

Обзорное исследование содержания микропластика в озерах мира подтвердило ши-

рокий разброс полученных результатов по содержанию микропластика в донных отложениях – от 0,7 до 7707 частиц/кг с медианой в 385 частиц/кг [Dusaucy et al., 2021]. Широкий диапазон значений может быть связан как с различиями в используемых методиках обработки проб, так и с разницей в антропогенной нагрузке на водные объекты. В финском озере Весиярви содержание микропластика в донных отложениях выше, чем в Ладожском озере, – $395,5 \pm 90,7$ частиц/кг [Scopetani et al., 2019]. В Онежском озере, втором по величине в Европе после Ладожского, среднее содержание микропластика в донных отложениях также значительно выше полученного по Ладоге – $2188,7 \pm 1164,4$ частицы/кг сухого веса [Zobkov et al., 2020].

Установленные в Ладожском озере закономерности по преобладающей форме (волокна) и размерному распределению частиц микропластика (до 1000 мкм) соответствуют другим исследованиям в этой области [Zobkov et al., 2020; Acharya et al., 2021; Dusaucy et al., 2021].

Проведение совместных исследований нескольких научных групп по интеркалибрации методик отбора, подготовке и анализу проб для определения содержания частиц микропластика в дальнейшем даст возможность более точно сравнивать результаты исследований на разных водных объектах.

Заключение

В Ладожском озере частицы микропластика зафиксированы во всех исследуемых пробах воды и донных отложений. Наибольшее содержание микропластика в поверхностном слое водной толщи наблюдается вблизи урбанизированных территорий (города Приозерск и Сортавала) и промышленных объектов (комбинат в городе Питкяранта), а также в местах впадения некоторых рек (Вуокса и Янисйоки). Для донных отложений наибольшие значения зафиксированы вблизи города Питкяранта и шхерных районов северной части Ладожского озера.

Полученные результаты на данный момент не позволяют выявить четких закономерностей распределения микропластика в поверхностном слое водной толщи и донных отложениях Ладожского озера. Проведение многолетних работ на акватории позволит в дальнейшем лучше понять причины повышенного содержания частиц пластика в определенных областях, источники поступления, механизмы транспортировки микропластика и его трансформации в водных объектах.

ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН благодарит Ресурсный центр «Геомодель» СПбГУ за выполнение работ на рамановском спектрометре Horiba Jobin-Yvon LabRam HR800.

Литература

- 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., Makeeva И. Н., Татаренко Ю. А. Исследование загрязнения микропластиком морей российской Арктики и Дальнего Востока // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11, № 2. С. 164–177. doi: 10.25283/2223-4594-2021-2-164-177
- Есюкова Е. Е., Чубаренко И. П. Микропластик в водной толще, донных осадках и песках пляжей юго-восточной части Балтийского моря: концентрации, распределение частиц по размерам и формам // Региональная экология. 2019. № 2(56). С. 16–29. doi: 10.30694/1026-5600-2019-2-16-29
- Зобков М. Б., Чубаренко И. П., Есюкова Е. Е., Белкина Н. А., Ковалевский В. В., Зобкова М. В., Ефремова Т. А., Галахина Н. Е. Озера как аккумуляторы микропластика на его пути с суши в Мировой океан. Обзор исследований // Известия РГО. 2021. Т. 153, № 4. С. 1–19. doi: 10.31857/S0869607121040054
- Ильина О. В., Колобов М. Ю., Ильинский В. В. Пластиковое загрязнение прибрежных поверхностных вод среднего и южного Байкала // Водные ресурсы. 2021. Vol. 48, no. 1. P. 42–51. doi: 10.31857/s0321059621010181
- Качинский Н. А. Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения. М.: АН СССР, 1958. 191 с.
- Ладожское озеро и достопримечательности его побережья. Атлас / Ред. В. А. Румянцев. СПб: Нестор-История, 2015. 200 с.
- Поздняков Ш. Р., Каретников С. Г., Иванова Е. В., Тихонова Д. А., Лапенков А. Е., Гузева А. В. Опыт использования фильтрационной установки для изучения вертикального распределения микропластика в водной толще // Российский журнал прикладной экологии. 2021. № 4(28). С. 41–45. doi: 10.24852/2411-7374.2021.4.41.45
- Acharya S., Rumi S. S., Hu Y., Abidi N. Microfibers from synthetic textiles as a major source of microplastics in the environment: A review // Text. Res. J. 2021. Vol. 91, no. 17–18. P. 2136–2156. doi: 10.1177/0040517521991244
- Andrady A. L. Microplastics in the marine environment // Mar. Poll. Bull. 2011. Vol. 62, no. 8. P. 1596–1605. doi: 10.1016/j.marpolbul.2011.05.030
- Campanale C., Massarelli C., Savino I., Locaputo V., Uricchio V. F. A detailed review study on potential effects of microplastics and additives of concern on human health // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2020. Vol. 17, no. 4. Art. 1212. doi: 10.3390/ijerph17041212
- Coppock R. L., Cole M., Lindeque P. K., Queiros A. M., Galloway T. S. A small-scale, portable method for extracting microplastics from marine sediments // Environ. Pollut. 2017. Vol. 230. P. 829–837. doi: 10.1016/j.envpol.2017.07.017
- De Sá L. C., Oliveira M., Ribeiro F., Rocha L. T., Futter M. N. Studies of the effects of microplastics on aquatic organisms: What do we know and where should we focus our efforts in the future? // Sci. Total Environ. 2018. Vol. 645. P. 1029–1039. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.207
- Dusaucy J., Gateuille D., Perrette Y., Naffrechoux E. Microplastic pollution of worldwide lakes // Environ. Pollut. 2021. Vol. 284. Art. 117075. doi: 10.1016/j.envpol.2021.117075
- Ershova A., Makeeva I., Malgina E., Sobolev N., Smolokurov A. Combining citizen and conventional basin for microplastics monitoring in the White Sea basin (Russian Arctic) // Mar. Poll. Bull. 2021. Vol. 173. Art. 112955. doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.112955
- Frank Y. A., Vorobiev D. S., Kayler O. A., Vorobiev E. D., Kulinicheva K. S., Trifonov A. A., Hunter T. S. Evidence for microplastics contamination of the remote tributary of the Yenisei river, Siberia – the pilot study results // Water (Switzerland). 2021a. Vol. 13, no. 22. Art. 3248. doi: 10.3390/w13223248
- Frank Y. A., Vorobiev E. D., Vorobiev D. S., Trifonov A. A., Antsiferov D. V., Hunter T. S., Wilson S. P., Strezov V. Preliminary screening for microplastic concentrations in the surface water of the Ob and Tom rivers in Siberia, Russia // Sustainability (Switzerland). 2021b. Vol. 13, no. 1. P. 1–14. doi: 10.3390/su13010080
- Guide to microplastic identification // Marine & Environmental Research Institute. 2015. 13 p.
- Ivanova E. V., Pozdnyakov Sh. R., Tikhonova D. A. Analysis of microplastic concentrations in water and bottom sediments as a new aspect of ecological monitoring // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 834, no. 1. Art. 012057. doi: 10.1088/1755-1315/834/1/012057
- Karlsson T. M., Kärrman A., Rotander A., Hassellöv M. Comparison between manta trawl and in situ pump filtration methods, and guidance for visual identification of microplastics in surface waters // Environ. Sci. Pollut. Res. 2020. Vol. 27. P. 5559–5571. doi: 10.1007/s11356-019-07274-5
- Karnauchov D., Biritskaya S., Dolinskaya E., Teplykh M., Silenko N., Ermolaeva Y., Silow E. Pollution by macro- and microplastic of large lacustrine ecosystems in eastern Asia // Pollut. Res. 2020. Vol. 39, no. 2. P. 353–355.
- Lisina A. A., Platonov M. M., Lomakov O. L., Sazonov A. A., Shishova T. V., Berkovich A. K., Frolova N. L. Microplastic Abundance in Volga River: Results of a pilot study in summer 2020 // Geogr. Environ. Sustain. 2021. Vol. 14, no. 3. P. 82–93. doi: 10.24057/2071-9388-2021-041
- Malygina N., Mitrofanova E., Kuryatnikova N., Biryukov R., Zolotov D., Pershin D., Chernykh D. Microplastic Pollution in the surface waters from plain and mountainous lakes in Siberia, Russia // Water. 2021. Vol. 13, no. 16. Art. 2287. doi: 10.3390/w13162287
- 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 // NOAA Marine Debris Program. 2015. 31 p.

Pozdnyakov Sh. R., Ivanova E. V., Guzeva A. V., Shalunova E. P., Martinson K. D., Tikhonova D. A. Studying the concentration of microplastic particles in water, bottom sediments and subsoils in the coastal area of the Neva Bay, the Gulf of Finland // *Water Resources*. 2020. Vol. 47, no. 4. P. 599–607. doi: 10.1134/S0097807820040132

Scopetani C., Chelazzi D., Cincinelli A., Esterhuizen M. Assessment of microplastic pollution: occurrence and characterisation in Vesijärvi lake and Pikku Vesijärvi pond, Finland // *Environ. Monit. Assess.* 2019. Vol. 191, no. 11. Art. 652. doi: 10.1007/s10661-019-7843-z

Tamminga M., Stoewer S.-C., Fischer E. K. On the representativeness of pump water samples versus manta sampling in microplastic analysis // *Environ. Pollut.* 2019. Vol. 254. Art. 112970. doi: 10.1016/j.envpol.2019.112970

Uurasjärvi E., Hartikainen S., Setälä O., Lehtiniemi M., Koistinen A. Microplastic concentrations, size distribution, and polymer types in the surface waters of a northern European lake // *Water Environ. Res.* 2020. Vol. 92. P. 149–156. doi: 10.1002/wer.1229

Yuan Z., Rajat N., Cummins E. Human health concerns regarding microplastics in the aquatic environment – From marine to food systems // *Sci. Total Environ.* 2022. Vol. 823. Art. 153730. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153730

Zobkov M., Belkina N., Kovalevski V., Zobkova M., Efremova T., Galakhina N. Microplastic abundance and accumulation behavior in Lake Onego sediments: A journey from the river mouth to pelagic waters of the large boreal lake // *J. Environ. Chem. Eng.* 2020. Vol. 8, no. 5. Art. 104367. doi: 10.1016/j.jece.2020.104367

Zobkov M., Esiukova E. Microplastics in Baltic bottom sediments: Quantification procedures and first results // *Marine Pollut. Bull.* 2017. Vol. 114, no. 2. P. 724–732. doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.10.060

References

Acharya S., Rumi S. S., Hu Y., Abidi N. Microfibers from synthetic textiles as a major source of microplastics in the environment: A review. *Text. Res. J.* 2021;91(17-18): 2136–2156. doi: 10.1177/0040517521991244

Andrady A. L. Microplastics in the marine environment. *Mar. Poll. Bull.* 2011;62(8):1596–1605. doi: 10.1016/j.marpolbul.2011.05.030

Blinovskaya Ya. Yu., Yakimenko A. L. The water area pollution analysis of Peter the Great Bay (Sea of Japan) by microplastic. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in Current Natural Sciences*. 2018;1:68–73. (In Russ.)

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

Coppock R. L., Cole M., Lindeque P. K., Queiros A. M., Galloway T. S. A small-scale, portable method for extracting microplastics from marine sediments. *En-*

viron. Pollut. 2017;230:829–837. doi: 10.1016/j.envpol.2017.07.017

De Sá L. C., Oliveira M., Ribeiro F., Rocha L. T., Futter M. N. Studies of the effects of microplastics on aquatic organisms: What do we know and where should we focus our efforts in the future? *Sci. Total Environ.* 2018;645:1029–1039. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.207

Dusaucy J., Gateuille D., Perrette Y., Naffrechoux E. Microplastic pollution of worldwide lakes. *Environ. Pollut.* 2021;284:117075. doi: 10.1016/j.envpol.2021.117075

Ershova A. A., Eremina T. R., Dunayev A. L., Makeeva I. N., Tatarenko Y. A. Study of microplastic pollution in the seas of the Russian Arctic and the Far East. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy*. 2021;11(2):164–177. doi: 10.25283/2223-4594-2021-2-164-177 (In Russ.)

Ershova A., Makeeva I., Malgina E., Sobolev N., Smolokurov A. Combining citizen and conventional science for microplastics monitoring in the White Sea basin (Russian Arctic). *Mar. Poll. Bull.* 2021;173:112955. doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.112955

Esiukova E. E., Chubarenko I. P. Microplastics in the water column, bottom sediments, and beach sands of the southeastern Baltic Sea: Concentrations, particle distributions by size and shape. *Regional'naya ekologiya = Regional Ecology*. 2019;2(56):16–29. doi: 10.30694/1026-5600-2019-2-16-29 (In Russ.)

Frank Y. A., Vorobiev D. S., Kayler O. A., Vorobiev E. D., Kulinicheva K. S., Trifonov A. A., Hunter T. S. Evidence for microplastics contamination of the remote tributary of the Yenisei river, Siberia – the pilot study results. *Water (Switzerland)*. 2021;13(22):3248. doi: 10.3390/w13223248

Frank Y. A., Vorobiev E. D., Vorobiev D. S., Trifonov A. A., Antsiferov D. V., Hunter T. S., Wilson S. P., Strezov V. Preliminary screening for microplastic concentrations in the surface water of the Ob and Tom rivers in Siberia, Russia. *Sustainability (Switzerland)*. 2021;13(1):1–14. doi: 10.3390/su13010080

Guide to microplastic identification. Marine & Environmental Research Institute. 2015. 13 p.

Il'ina O. V., Kolobov M. Yu., Il'inskii V. V. Plastic pollution of the coastal surface water in the middle and southern Baikal. *Water Resources*. 2021;48(1):42–51. doi: 10.31857/s0321059621010181

Ivanova E. V., Pozdnyakov Sh. R., Tikhonova D. A. Analysis of microplastic concentrations in water and bottom sediments as a new aspect of ecological monitoring. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2021;834(1):012057. doi: 10.1088/1755-1315/834/1/012057

Kachinski N. A. Mechanical and microaggregate composition of soil: Methods. AS USSR, Moscow; 1958. 191 p.

Karlsson T. M., Kärrman A., Rotander A., Hasse-llöv M. Comparison between manta trawl and in situ pump filtration methods, and guidance for visual identification of microplastics in surface waters. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2020. Vol. 27. P. 5559–5571. doi: 10.1007/s11356-019-07274-5

Karnaukhov D., Biritskaya S., Dolinskaya E., Teplykh M., Silenko N., Ermolaeva Y., Silow E. Pollution by

macro-and microplastic of large lacustrine ecosystems in eastern Asia. *Pollut. Res.* 2020;39(2):353–355.

Lisina A. A., Platonov M. M., Lomakov O. L., Sazonov A. A., Shishova T. V., Berkovich A. K., Frolova N. L. Microplastic abundance in Volga River: Results of a pilot study in summer 2020. *Geogr. Environ. Sustain.* 2021;14(3):82–93. doi: 10.24057/2071-9388-2021-041

Malygina N., Mitrofanova E., Kuryatnikova N., Biryukov R., Zolotov D., Pershin D., Chernykh D. Microplastic pollution in the surface waters from plain and mountainous lakes in Siberia, Russia. *Water.* 2021;13(16):2287. doi: 10.3390/w13162287

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. *NOAA Marine Debris Program.* 2015. 31 p.

Pozdnyakov Sh. R., Ivanova E. V., Guzeva A. V., Shalunova E. P., Martinson K. D., Tikhonova D. A. Studying the concentration of microplastic particles in water, bottom sediments and subsoils in the coastal area of the Neva Bay, the Gulf of Finland. *Water Resources.* 2020;47(4):599–607. doi: 10.1134/S0097807820040132

Pozdnyakov Sh. R., Karetnikov S. G., Ivanova E. V., Tikhonova D. A., Lapenkov A. E., Guzeva A. V. Experience of using a filtration device for studying vertical distribution of microplastics in water column. *Rossiiskii zhurnal prikladnoi ekologii = Russian Journal of Applied Ecology.* 2021;4(28):41–45. doi: 10.24852/2411-7374.2021.4.41.45 (In Russ.)

Rumyantsev V. A. (ed.). Lake Ladoga and the coastal remarkable sights. The Atlas. St. Petersburg: Nestor-Historia; 2015. 200 p. (In Russ.)

Scopetani C., Chelazzi D., Cincinelli A., Esterhuizen M. Assessment of microplastic pollution: Occurrence and characterisation in Vesijärvi lake and Pikku Vesijärvi pond, Finland. *Environ. Monit. Assess.* 2019;191(11):652. doi: 10.1007/s10661-019-7843-z

Tamminga M., Stoewer S.-C., Fischer E. K. On the representativeness of pump water samples versus manta sampling in microplastic analysis. *Environ. Pollut.* 2019;254:112970. doi: 10.1016/j.envpol.2019.112970

Uurasjärvi E., Hartikainen S., Setälä O., Lehtiniemi M., Koistinen A. Microplastic concentrations, size distribution, and polymer types in the surface waters of a northern European lake. *Water Environment Research.* 2020;92:149–156. doi: 10.1002/wer.1229

Yuan Z., Rajat N., Cummins E. Human health concerns regarding microplastics in the aquatic environment – From marine to food systems. *Sci. Total Environ.* 2022;823:153730. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153730

Zobkov M., Belkina N., Kovalevski V., Zobkova M., Efremova T., Galakhina N. Microplastic abundance and accumulation behavior in Lake Onego sediments: A journey from the river mouth to pelagic waters of the large boreal lake. *J. Environ. Chem. Eng.* 2020;8(5):104367. doi: 10.1016/j.jece.2020.104367

Zobkov M. B., Chubarenko I. P., Esiukova E. E., Belkina N. A., Kovalevski V. V., Zobkova M. V., Efremova T. A., Galakhina N. E. Lakes as accumulators of microplastics on the way from land to the world ocean: A review. *Izvestiya RGS.* 2021;153(4):1–19. doi: 10.31857/S0869607121040054 (In Russ.)

Zobkov M., Esiukova E. Microplastics in Baltic bottom sediments: Quantification procedures and first results. *Mar. Poll. Bull.* 2017;114(2):724–732. doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.10.060

Поступила в редакцию / received: 16.05.2022; принята к публикации / accepted: 02.09.2022.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Иванова Екатерина Викторовна

канд. геогр. наук, научный сотрудник Лаборатории комплексных проблем лимнологии

e-mail: spb.spt@mail.ru

Тихонова Дарья Алексеевна

младший научный сотрудник Лаборатории комплексных проблем лимнологии

e-mail: tdasha94@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Ivanova, Ekaterina

Cand. Sci. (Geogr.), Researcher

Tikhonova, Daria

Junior Researcher