

УДК 504.06

ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОПЛАСТИКА В ВОДНОЙ ТОЛЩЕ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА¹

© 2024 г. Д. А. Тихонова^{a, b, *}, С. Г. Каретников^a, Е. В. Иванова^a, Е. П. Шалунова^b

^a Институт озерадения РАН — обособленное структурное подразделение “Санкт-Петербургский
Федеральный исследовательский центр Российской академии наук”

Санкт-Петербург, 196105 Россия

^b Санкт-Петербургский государственный университет
Санкт-Петербург, 199034 Россия

*e-mail: tdasha94@mail.ru

Поступила в редакцию 16.05.2023 г.

После доработки 25.09.2023 г.

Принята к публикации 08.10.2023 г.

Исследовано вертикальное распределение микропластика в Ладожском озере в условиях прямой плотностной стратификации с наличием слоя температурного скачка и при гомотермии. С использованием насосной фильтровальной установки отобраны пробы воды на разных водных горизонтах (0–70 м) в различных гидрологических условиях и проведен сравнительный анализ концентраций частиц микропластика размером 60–5000 мкм. Частицы микропластика анализировались под оптическим микроскопом, а также методом спектроскопии комбинационного рассеяния света. На основе полученных данных сделан вывод о том, что в условиях плотностной стратификации концентрации частиц микропластика в слое скачка и над ним повышены по сравнению с нижележащими слоями (50 ± 40.2 и 15.9 ± 13 частиц/м³ соответственно). В условиях гомотермии вертикальное распределение микропластика в поверхностном слое и водной толще носит более равномерный характер (17.3 ± 17.8 и 12.7 ± 15.6 частиц/м³ соответственно).

Ключевые слова: микропластик, вертикальное распределение микропластика, слой температурного скачка, Ладожское озеро.

DOI: 10.31857/S0321059624020089 **EDN:** CHLEDF

ВВЕДЕНИЕ

Во всем мире активно развиваются исследования в области оценки загрязнения микропластиком различных водных объектов. Однако большинство исследований содержания микропластика в воде сфокусированы на анализе поверхностного слоя воды, в то время как вертикальное распределение частиц в водной толще изучено мало, в связи с чем представляет большой интерес. Необходимость изучения содержания микропластика на разных водных горизонтах обусловлена тем, что со временем на частицах микропластика образуется биопленка из колоний микроорганизмов, что влияет на гидрофобность и плавучесть данных частиц и ведет к их опусканию с поверхности в более глубокие слои [15, 16]. Малоизученными все еще остаются механизмы по-

ведения частиц микропластика в водной толще, а также влияние различных факторов на их распределение на разных водных горизонтах.

В последнее время исследования вертикального распределения микропластика в водной толще проводились преимущественно в морях и океанах [4, 6, 7, 10, 17, 21, 22, 26], реках [9, 12, 18, 19], и совсем мало исследований в данной области приходится на озера [18, 25]. В связи с этим проведение подобных работ на пресноводных объектах представляет особый интерес. В то же время лишь в малом количестве исследований рассматривается распределение микропластика в водной толще с учетом стратификации водных объектов [6, 26]. Также отсутствуют однозначные выводы о том, на каких водных горизонтах концентрируется большее количество частиц микропластика: ряд работ указывает на повышенные содержания микропластика в поверхностном слое водной толщи [21, 22], в то время как другие исследования не обнаруживают подобных закономерностей [9, 26].

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН — СПб ФИЦ РАН (тема FFZF-2024-0002 “Современные угрозы водным объектам и инновационные методы их сохранения, восстановления и рационального использования”).

Цель данной работы — изучение содержаний микропластика на разных водных горизонтах Ладожского озера с учетом термических условий. В Ладожском озере наблюдается разнообразие гидрологических условий, связанное с большими размерами озера и значительными глубинами (до 230 м). В определенные сезоны года (преимущественно в весенний и летний периоды) в озере наблюдается так называемый слой температурного скачка или термоклин. Слой температурного скачка является пограничной областью между теплой водой перемешанного слоя и более холодными водами в нижних слоях. Авторы предположили, что в слое скачка могут задерживаться частицы микропластика, так как из-за высокого градиента плотности в данном слое также происходит концентрация осаждающихся органических веществ с верхнего слоя [3]. В настоящей работе впервые проведен анализ концентраций микропластика над слоем скачка и под ним для анализа потенциального влияния данного слоя на вертикальное распределение исследуемых частиц. Полученные данные сравниваются с содержаниями микропластика в водной толще в условиях гомотермии и свободного перемешивания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Отбор проб

Пробы воды отбирались с помощью фильтровальной установки, разработанной в Институте озероведения РАН — СПб ФИЦ РАН [2]. Установка предполагает использование бытового вибрационного электрического насоса малой мощности. К водозаборной части насоса прикрепляется шланг с фильтровальной установкой, которая опускается на требуемую глубину отбора, при этом сам насос находится в поверхностном слое воды. Таким образом, данная установка позволяет отбирать пробы с различных глубин водной толщи.

В установку помещалась металлическая сетка с размером ячеек 60 мкм. Объем профильтрованной воды фиксировался с помощью электронного счетчика и учитывался при расчете концентраций частиц микропластика на 1 м³. После окончания фильтрации установка поднималась

на борт судна, вымывание пробы при подъеме устройства исключалось за счет наличия в конструкции обратного клапана. Фильтр с пробой вынимался из установки и помещался в емкость с дистиллированной водой, места крепления сетки тщательно промывались дистиллированной водой в ту же емкость. До этапа обработки пробы хранились в холодильнике.

Пробы отбирались в 2020–2022 гг. в весенний (июнь) и осенний (октябрь) гидрологические сезоны, когда в озере меньше взвеси, препятствующей фильтрации большого объема воды и, следовательно, способствующей понижению точности измерений. Отобрано 140 проб в 25 точках на различных водных горизонтах: 0, 5, 10, 15, 30, 35, 45, 50, 65, 70 м в зависимости от глубины озера в точке отбора и от вертикального распределения температуры воды. При наличии слоя температурного скачка пробы отбирались в поверхностном слое, на верхней границе слоя скачка или внутри него, а также под ним. При гомотермии пробы отбирались по всему столбу воды на разных горизонтах. Глубины озера в точках отбора были от 15 м (в южной и западной части) до 80–100 м (в северной части). В шхерных районах северной части Ладоги глубины озера в точках отбора были от 10 до 53 м (рис. 1). Объем проб составлял 100–1000 л, в периоды наличия большого количества фитопланктона прокачивалось меньшее количество литров в связи с забиванием фильтра взвесью. При малом объеме пробы в одной точке (до 500 л) пробы отбирались в двух-трех повторностях.

Параллельно с отбором проб воды на микропластик проводились измерения вертикального распределения температуры в водной толще с помощью STD-зонда при различных гидрологических условиях. В весенний гидрологический сезон измерения проводились с учетом наличия слоя температурного скачка. За значимые вертикальные градиенты температуры воды, характеризующие наличие слоя вертикального температурного скачка, были приняты изменения температуры $\geq 0.5^\circ\text{C}/\text{м}$, предложенные в [1]. Слой температурного скачка при проведенных наблюдениях находился на глубинах 5–15 м. В осенний период исследования проводились в условиях свободной плотностной конвекции с отсутствием слоя скачка.

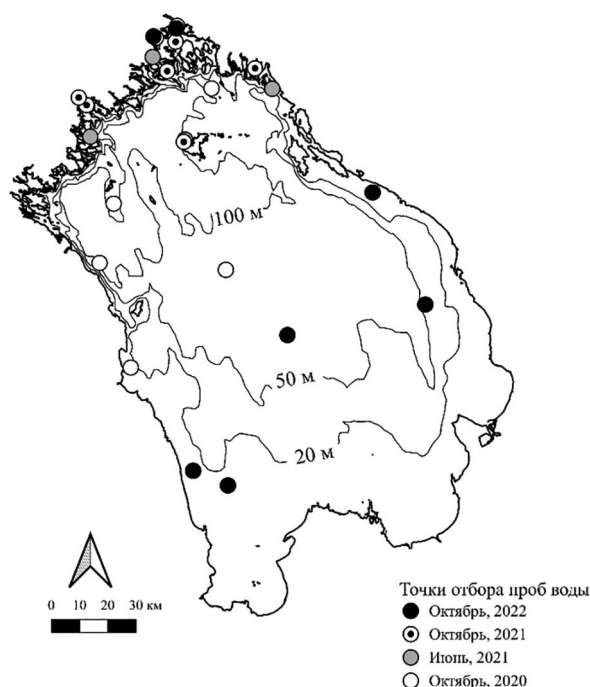


Рис. 1. Картограмма глубин Ладожского озера с точками отбора проб воды.

В условиях наличия слоя температурного скачка была отобрана 31 проба воды, при этом 16 из них были отобраны над данным слоем и 15 под ним. В условиях гомотермии было отобрано 109 проб, из них 45 проб в поверхностном слое и 64 пробы на разных горизонтах водной толщи.

Лабораторная подготовка проб воды

Наличие большого объема взвеси в пробе затрудняет дальнейший анализ. Для растворения органической взвеси образец смывался с сетки в стеклянную колбу, куда добавлялся реактив Фентона (30%-ный раствор перекиси водорода и Fe(II)-катализатор [20]). Далее проба выдерживалась на водяной бане при температуре 75°C в течение 40–60 мин в зависимости от количества органического материала, после чего отстаивалась в течение суток. Далее проба фильтровалась 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 проба анализировалась под микроскопом. Если проба визуально содержала

небольшое количество органического материала, она сразу смывалась с сетки на чашку Петри для последующего анализа.

Идентификация частиц микропластика

Предварительная идентификация частиц микропластика, а также определение их формы, размера и цвета выполнялись при помощи оптических микроскопов “Euler Professor 770T” с увеличением 40× и 100×. Для непрозрачных фрагментов использовался дополнительный источник отраженного света. Идентификация частиц проводилась по общепринятым критериям: отсутствие клеточной структуры, единообразная толщина и цвет частиц и др. [13]. Частицы идентифицировались в диапазоне 60–5000 мкм, нижняя граница определяемых частиц была обусловлена размером сетки-фильтра. Частицы размером 60–100 мкм анализировались при увеличении 100×, более крупные частицы (>100 мкм) в основном анализировались при увеличении 40×.

После предварительной визуальной идентификации на оптическом микроскопе проводился выборочный анализ химического состава наиболее подходящих по размеру частиц методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (рамановской спектроскопии) в геометрии обратного рассеяния света на спектрометрах “Horiba Jobin-Yvon LabRam HR800” (длины волн лазера, используемые в эксперименте для съемки разных частиц были 325, 488, 514 нм) и “SENTERRA” (Bruker) (длины волн лазера, используемые в эксперименте для съемки разных частиц были 488, 532, 785 нм). Интерпретация проводилась на основании сравнения с имеющимися спектрами в базах данных Horiba JY Raman Library FORENSIC V2, а также OMNIC Spectra 2.03.391 и Spectral ID v. 9.1. Исследования проведены с использованием оборудования ресурсных центров Научного парка СПбГУ “Геомодель” и “Оптические и лазерные методы исследования вещества”.

Контроль внешнего загрязнения

Для предотвращения внешнего загрязнения при отборе и лабораторной обработке проб минимизировалось применение пластиковых предметов и синтетических тканей. Во время работы

с пробами использовались лабораторные халаты и фиксировался цвет одежды. Для подготовки проб для анализа применялась стеклянная посуда и металлические сетки.

На этапе пробоподготовки проводился контроль внешнего загрязнения. Параллельно с основными пробами проводился анализ холостых проб (по одной холостой пробе для ряда проб, отобранных в одной точке). Для холостых проб воды использовалась дистиллированная вода, холостая проба обрабатывалась аналогично основным пробам. При анализе холостой пробы подсчитывались частицы, попадающие в образец в результате побочного загрязнения.

Статистический анализ и визуализация данных

Диаграммы и графики построены в программах Microsoft Excel 2019 и Grapher 7. Для создания карты точек отбора проб использовалась программа QGIS 3.14.15. При статистическом анализе характер распределения данных был проверен при помощи критерия Шапиро–Уилка. При отсутствии нормального распределения данных равенство выборок поверхностный слой – водная толща, а также выборок значений над и под слоем температурного скачка анализировалось при помощи U-критерия Манна–Уитни. Расчеты проводились при помощи веб-сайта Statistics Kingdom [24].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Контроль внешнего загрязнения

Всего в холостых пробах обнаружено 43 волокна и 2 фрагмента частиц, принятых за микропластик. Данные частицы были красными (32%), прозрачными (26%), синими (24%), черными (16%) и зелеными (2%). Количество обнаруженных в холостых пробах частиц вычиталось из абсолютных значений в каждой пробе. Также в пробах из Ладожского озера обнаружено 47 синих, 17 голубых, 1 белый и 47 зеленых фрагментов, идентифицированных по визуальным характеристикам как краска с научно-исследовательских судов, с которых происходил отбор проб. Данные частицы не учитывались при расчете итоговых концентраций микропластика.

Вертикальное распределение микропластика в водной толще

Во всех пробах воды было обнаружено 697 частиц, предварительно идентифицированных как микропластик. Среди обнаруженных частиц во всей водной толще Ладожского озера значительно преобладали волокна – 618 частиц (89%), также встречались пленки – 62 частицы (9%) и, редко, фрагменты – 17 частиц (2%).

Среднее содержание микропластика в поверхностном слое (0–5 м) составило 26 ± 29.6 , в водной толще – 14 ± 15.1 частиц/м³. U-критерий Манна–Уитни показал существенные различия между концентрациями микропластика в поверхностном слое и водной толще ($p = 0.02302$).

По цвету микроволокна были прозрачными (30%), красными (27%), черными (25%), синими (17%) и зелеными (1%). Среди фрагментов преобладали красные (69%), также встречались серые (19%), белые (6%), и черные (6%). Пленки преимущественно были прозрачные (95%); желтые, синие и красные пленки встречались в единичном экземпляре.

Большая часть анализируемых частиц микропластика имела размер в диапазоне от 60 до 1000 мкм (57%) (рис. 2). Количество частиц увеличивается с уменьшением их размера.

Методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) получены спектры полимеров для 43 частиц микропластика (22 волокна, 11 пленок и 10 фрагментов). Для девяти частиц, принятых по морфологическим характеристикам за краску с корпуса научно-исследовательских судов, двух волокон и одной пленки определены только спектры красителя. Спектры КРС еще десяти волокон и одного фрагмента не удалось расшифровать из-за сильной флуоресценции или отсутствия соответствующих референсных спектров в библиотеке спектрометра.

Наиболее часто встречающиеся типы полимеров – полипропилен (35%) и полиэтилентерефталат/полиэстер (35%). Также встречаются частицы полиамидов (14%), полистирола и сополимеров стирола (9%), полиэтилена (как вы-

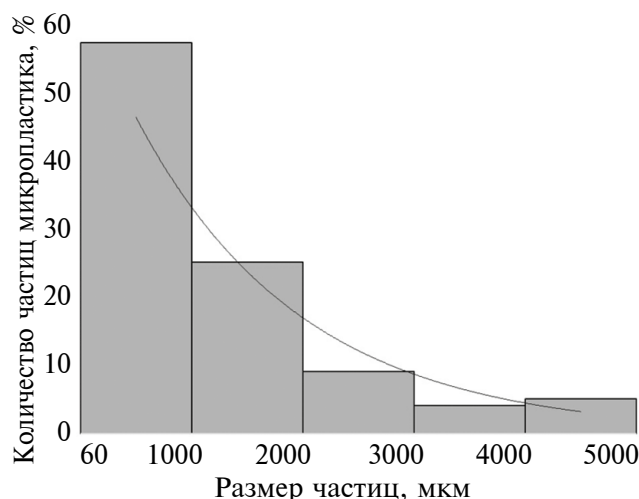


Рис. 2. Диапазон размеров частиц микропластика в водной толще Ладожского озера.

сокой, так и низкой плотности) (5%), полиакрилонитрила (2%).

Среди волокон преобладали полиэтилен-терефталат/полиэстер (55%) и полипропилен (27%), реже встречались сополимеры стирола (14%) и полиакрилонитрил (4%). Для фрагментов распределение полимеров было следующим: полиэтилен-терефталат (30%), полиамид (30%), полиэтилен (20%), полипропилен (10%) и полистирол (10%). Среди пленок преобладал полипропилен (73%), остальная часть (27%) – полиамид.

У частиц с большой долей вероятности – краски от научно-исследовательских судов в полученных спектрах КРС отмечались пики, позволяющие говорить о наличии диоксида титана, фталоцианиновых синих и зеленых пигментов, используемых в красках. Для одной пленки также был идентифицирован только спектр пигмента (медь фталоцианиновый синий пигмент “Heliogen blue 7087”). Для двух волокон удалось определить только спектр красителя данного волокна (пигмент “Reactive black 5” и пигмент “Orange” марки “Dominion Color Corporation”). Совпадение по большинству пиков может говорить о присутствии в волокнах близкого по составу пигмента той же группы/класса, который, возможно, отличается наличием/отсутствием ряда заместителей.

Фрагменты полиэтилена, полипропилена и полиамида обнаружены на разных глубинах, в том числе на глубине 70 м. Волокна полиэтилен-терефталата встречались и в поверхностном слое, однако больше волокон данного типа обнаружено в водной толще.

Вертикальное распределение микропластика в водной толще в условиях прямой плотностной стратификации и гомотермии

Среднее содержание микропластика над слоем скачка составило 50 ± 40.2 , под слоем скачка – 15.9 ± 13 частиц/м³ (рис. 3). U-критерий Манна–Уитни подтвердил значимое различие между содержаниями микропластика над и в слое температурного скачка и содержаниями данных частиц под термоклином ($p = 0.004$).

При гомотермии среднее содержание частиц микропластика – 17.3 ± 17.8 частиц/м³ в поверхностном слое (0–5 м) и 12.7 ± 15.6 частиц/м³ в водной толще (рис. 4). U-критерий Манна–Уитни подтвердил отсутствие значимых различий между выборками содержаний микропластика в верхнем слое и в водной толще ($p = 0.13$).

Таким образом, результаты исследования показали, что повышенные содержания микропластика в поверхностном слое наблюдаются только при условиях плотностной стратификации, в то время как при гомотермии вертикальное распределение частиц носит более равномерный характер.

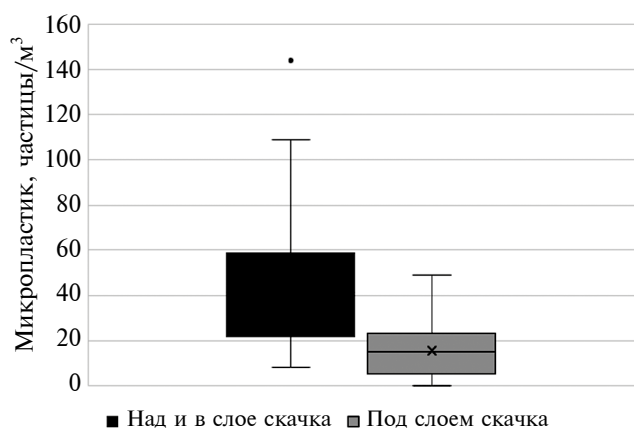


Рис. 3. Распределение частиц микропластика в водной толще при наличии слоя температурного скачка.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На вертикальное распределение частиц микропластика существенное влияние оказывает вертикальный водообмен. Вертикальные движения воды в водоеме обусловлены разницей температуры разных слоев и, как следствие, разницей в плотностной структуре воды. Для каждого гидрологического сезона характерно определенное вертикальное распределение температуры воды. Для весеннего и осеннего гидрологических сезонов характерна гомотермия, а для летнего и зимнего – плотностная стратификация.

Условия отбора проб влияют на характер распределения микропластика в водной толще. В периоды весенней и осенней гомотермии происходит интенсивное перемешивание воды (свободная конвекция), в связи с чем гидрологические факторы не должны оказывать влияния на дифференциацию распределения частиц микропластика. При исследовании Ладожского озера пробы в основном отбирались при данных условиях, для которых также характерно минимальное количество минеральной и органической взвеси в воде, что позволяет прокачать через фильтровальную установку как можно больший объем воды. При данных условиях (при отсутствии слоя температурного скачка) частицы микропластика распределялись относительно равномерно как в поверхностном слое, так и в толще воды. В пробах,

которые были отобраны в условиях формирования слоя вертикального температурного скачка, наибольшее количество микропластика было зафиксировано в данном слое и в поверхностном слое. По результатам некоторых исследований вертикального распределения микропластика в водной толще [21–22], содержание частиц на поверхности оказалось значительно выше, чем в водной толще. По данным [9, 26], распределение микропластика неоднородно. Лишь некоторые исследования вертикального распределения микропластика учитывали разницы температуры и плотности водных горизонтов. Так, в Балтийском море содержание микропластика было выше в приповерхностном и придонном слоях, а также в слоях скачка температуры и солености [26]. В Тихом океане микропластик концентрировался под перемешанным слоем [6]. В исследовании оз. Толлензе корреляция между температурой и содержанием микропластика не обнаружена [25]. Указанные различия могут быть объяснены вариациями гидрологических условий и характеристик водных объектов, а также влиянием неучтенных факторов.

Зафиксировано, что в Ладожском озере содержание микропластика в поверхностном слое выше, чем в водной толще, однако с учетом гидрологических условий это подтверждается только для данных, полученных при наличии слоя температурного скачка. Таким образом, повышенное содержание микропластика в поверхностном слое может быть обусловлено именно наличием термоклина в сезон отбора проб. Необходимы дальнейшие исследования вертикального распределения микропластика в водной толще также в летний и зимний гидрологические сезоны, что позволит лучше понять влияние ветровой конвекции, а также плотностной стратификации на перемещение микропластика в водной толще. Однако работы в эти сезоны сопряжены с определенными трудностями в связи с быстрым забиванием сетки органической и минеральной взвесью летом и отсутствием в Ладожском озере постоянного ледового покрова зимой.

На скорость оседания частиц микропластика в толщу воды может также влиять их плотность, форма и размер [11]. Так, при исследовании

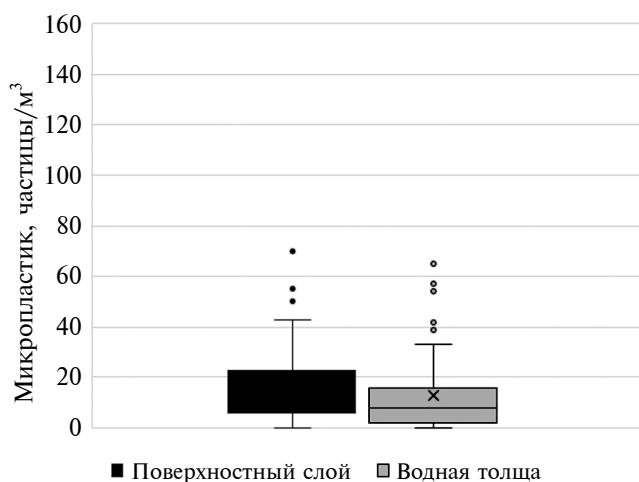


Рис. 4. Распределение частиц микропластика в водной толще при гомотермии.

оз. Толлензе в Германии большее содержание фрагментов было отмечено в поверхностном слое, в то время как волокна распределялись в водной толще относительно равномерно [25]. В оз. Мичиган и р. Милуоки волокна также распределялись в водной толще независимо от их плотности [18]. По результатам исследования, в Ладожском озере во всей водной толще преобладают волокна, а фрагменты встречаются реже и на разных водных горизонтах. Фрагменты, идентифицированные как хлопья краски с научного судна, также встречаются на разных глубинах, несмотря на то что часто краска и фрагменты конструкционного материала от лодок и кораблей являются отрицательно плавучими видами пластика, такими как алкиды и полиакрилаты [8]. Несмотря на их высокую плотность, они в большом количестве встречаются и в поверхностном слое, где поверхностное натяжение обеспечивает их плавучесть [23]. В данном исследовании не обнаружено закономерностей в плотностном распределении частиц микропластика в водной толще. В дальнейших работах по изучению вертикального распределения микропластика в водной толще целесообразно провести оценку зависимостей содержания частиц микропластика на разных глубинах от их плотности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При растущем интересе к исследованию микропластика в водных объектах остаются малоизученными механизмы вертикального распределения частиц в водной толще. Формирование выводов о загрязнении водных объектов микропластиком только на основании информации о содержании данных частиц в поверхностном слое воды может приводить к пере- или недоучету общего содержания микропластика в водном объекте.

Использование насосной фильтровальной установки дает возможность отбирать пробы воды для определения концентраций микропластика на различных водных горизонтах. Учет вертикальной термической стратификации озера при оценке концентраций микропластика на разных горизонтах позволил исследовать вертикальное распределение частиц микропластика

в Ладожском озере. Впервые обнаружено, что в Ладожском озере распределение микропластика в водной толще зависит от плотностной структуры воды. При наличии слоя температурного скачка микропластик концентрируется в этом слое и над ним, в отличие от нижележащих слоев. В условиях гомотермии и свободной конвекции распределение микропластика в водной толще носит равномерный характер. Таким образом, авторами сделан предварительный вывод о влиянии слоя температурного скачка на характер вертикального распределения частиц, однако для подтверждения данной теории необходимы дополнительные исследования в летний и зимний гидрологические сезоны в условиях устойчивой плотностной стратификации озера. Особое внимание следует также уделить определению плотности частиц микропластика, зафиксированных на разных глубинах, для определения влияния характеристик частиц на их вертикальное распределение в озере.

Авторы выражают благодарность ресурсным центрам Научного парка СПбГУ “Геомодель” и “Оптические и лазерные методы исследования вещества” за выполнение работ на их оборудовании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Науменко М.А., Гузиватый В.В. Методические подходы и результаты анализа климатического сезонного хода параметров устойчивой стратификации димиктического озера (на примере центральной части Ладожского озера) // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 1. С. 52–62.
2. 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 // Рос. журн. приклад. экологии. 2021. № 4 (28). С. 41–45.
3. Садчиков А.П., Остроумов С.А. Эпилимнион, металимнион и гипolimнион мезотрофной водной экосистемы: функциональная роль вертикальной структуры экосистемы водоема по гидрохимическим и биологическим параметрам // Экол. химия. 2019. Т. 28. № 6. С. 291–296.
4. Bagaev A., Mizyuk A., Khatmullina L., Isachenko I., Chubarenko I. Anthropogenic fibres in the Baltic Sea

- water column: Field data, laboratory and numerical testing of their motion // *Sci. Total Environ.* 2017. V. 599–600. P. 560–571. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.04.185
5. Burns E.E., Boxall A.B.A. Microplastics in the aquatic environment: Evidence for or against adverse impacts and major knowledge gaps // *Environ. Toxicol. Chem.* 2018. V. 37. № 11. P. 2776–2796.
 6. Choy C.A., Robison B.H., Gagne T.O., Erwin B., Firl E., Halden R.U., Hamilton J.A., Katija K., Lisin S.E., Rolsky Ch., Van Houtan K.S. The vertical distribution and biological transport of marine microplastics across the epipelagic and mesopelagic water column // *Sci. Rep.* 2019. V. 9. 7843.
 7. Dai Z., Zhang H., Zhou Q., Tian Y., Chen T., Tu C., Fu C., Luo Y. Occurrence of microplastics in the water column and sediment in an inland sea affected by intensive anthropogenic activities // *Environ. Pollution.* 2018. V. 242. P. 1557–1565.
 8. Fuente de la R., Dróto G., Hernández-García E., López C., van Sebille E. Sinking microplastics in the water column: simulations in the Mediterranean Sea // *Ocean Sci.* 2021. V. 17. P. 431–453.
 9. Dris R., Gasperi J., Rocher V., Tassin B. Synthetic and non-synthetic anthropogenic fibers in a river under the impact of Paris Megacity: sampling methodological aspects and flux estimations // *Sci. Total Environ.* 2018. V. 618. P. 157–164.
 10. Egger M., Sulu-Gambari F., Lebreton L. First evidence of plastic fallout from the north pacific garbage patch // *Sci. Rep.* 2020. V. 10. 7495.
 11. Enders K., Lenz R., Stedmon C.A., Nielsen T.G. Abundance, size and polymer composition of marine microplastics ≥ 10 mm in the Atlantic Ocean and their modelled vertical distribution // *Marine Pollution Bull.* 2015. V. 100. № 1. P. 70–81.
 12. Eo S., Hong S.H., Song Y.K., Han G.M., Shim W.J. Spatiotemporal distribution and annual load of microplastics in the Nakdong River, South Korea // *Water Resear.* 2019. V. 160. P. 228–237.
 13. Guide to Microplastic Identification // Marine & Environmental Research Institute. 2015. 13 p.
 14. 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 // *Environ. Sci. Technol.* 2012. V. 46. № 6. P. 3060–3075.
 15. Kaiser D., Kowalski N., Waniek J.J. Effects of biofouling on the sinking behavior of microplastics // *Environ. Res. Lett.* 2017. V. 12. № 12. 124003.
 16. Kooi M., Nes van E.H.V., Scheffer M., Koelmans A.A. Ups and Downs in the Ocean: Effects of Biofouling on Vertical Transport of Microplastics // *Environ. Sci. Technol.* 2017. V. 51. № 14. P. 7963–7971.
 17. Kooi M., Reisser J., Slat B., Ferrari F.F., Schmid M.S., Cunsolo S., Brambini R., Noble K., Sirks L.-A., Linders T.E.W., Schoeneich-Argent R.I., Koelmans A.A. The effect of particle properties on the depth profile of buoyant plastics in the ocean // *Sci. Rep.* 2016. V. 6. 33882.
 18. Lenaker P.L., Baldwin A.K., Corsi S.R., Mason S.A., Renau P.C., Scott J.W. Vertical distribution of microplastics in the water column and surficial sediment from the Milwaukee River basin to Lake Michigan // *Environ. Sci. Technol.* 2019. V. 53. P. 12227–12237.
 19. Liedermann M., Gmeiner P., Pessenlehner S., Haimann M., Hohenblum P., Habersack H. A methodology for measuring microplastic transport in large or medium rivers // *Water.* 2018. V. 10. № 4. 414.
 20. 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.
 21. Reisser J., Slat B., Noble K., du Plessis K., Epp M., Proietti M., Sonnevile de J., Becker T., Pattiaratchi C. The vertical distribution of buoyant plastics at sea: an observational study in the North Atlantic Gyre // *Biogeosci.* 2015. V. 12. № 4. 1249.
 22. Song Y.K., Hong S.H., Eo S., Jang M., Han G.M., Isobe A., Shim W.J. Horizontal and vertical distribution of microplastics in Korean coastal waters // *Environ. Sci. Technol.* 2018. V. 52. P. 12188–12197.
 23. Song Y.K., Hong S.H., Jang M., Kang J.-H., Kwon O.Y., Han G.M., Shim W.J. Large Accumulation of Micro-sized Synthetic Polymer Particles in the Sea Surface Microlayer // *Environ. Sci. Technol.* 2014. V. 48. № 16. P. 9014–9021.
 24. Statistics Kingdom. 2017. [Электронный ресурс]. <https://www.statskingdom.com/index.html> (дата обращения: 23.05.2023)
 25. Tamminga M., Fischer E.K. Microplastics in a deep, dimictic lake of the North German Plain with special regard to vertical distribution patterns // *Environ. Pollution.* 2020. V. 267. 115507.
 26. Zobkov M.B., Esiukova E.E., Zyubinc A.Y., Samusev I.G. Microplastic content variation in water column: The observations employing a novel sampling tool in stratified Baltic Sea // *Marine Pollution Bull.* 2019. V. 138. P. 193–205.