

ОЗЕРА КАК АККУМУЛЯТОРЫ МИКРОПЛАСТИКА НА ПУТИ С СУШИ В МИРОВОЙ ОКЕАН: ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ

© 2021 г. М. Б. Зобков^{a, *}, И. П. Чубаренко^{b, **}, Е. Е. Есюкова^{b, ***},
Н. А. Белкина^{a, ****}, В. В. Ковалевский^{a, c, *****}, М. В. Зобкова^{a, *****},
Т. А. Ефремова^{a, *****}, Н. Е. Галахина^{a, *****}

^aИнститут водных проблем Севера КарНЦ РАН, Петрозаводск, Россия

^bИнститут океанологии им. П.П. Шишова РАН, Москва, Россия

^cИнститут геологии КарНЦ РАН, Петрозаводск, Россия

*E-mail: duet@onego.ru

**E-mail: irina_chubarenko@mail.ru

***E-mail: elena_esiukova@mail.ru

****E-mail: bel110863@mail.ru

*****E-mail: kovalevs@krc.karelia.ru

*****E-mail: rincalika21@yandex.ru

*****E-mail: efremova.nwpi@mail.ru

*****E-mail: kulakovanata@mail.ru

Поступила в редакцию 11.04.2021 г.

После доработки 21.06.2021 г.

Принята к публикации 25.06.2021 г.

В работе обобщена информация о закономерностях переноса и накопления микропластика в поверхностных водах суши в сравнении их с континентальными морями. Анализируются сведения, опубликованные в зарубежной и отечественной литературе. Представлен сравнительный анализ оригинальных материалов, полученный авторами в процессе исследований в Балтийском море и Онежском озере с применением идентичных методов определения микропластика, проведено сравнение результатов. Особое внимание уделено путям и объемам поступления микропластика в континентальные моря и Мировой океан. Выявлено статистически большее количество микропластика в донных осадках Онежского озера по сравнению с осадками Балтийского моря. Обсуждены возможные причины такого различия. Волокна являются наиболее распространенной формой микропластика в Балтийском море и Онежском озере. В донных осадках волокна аккумулируются преимущественно в зонах осадконакопления с низкой гидродинамической активностью (для Балтийского моря – глубины больше 80 м, для открытой части Онежского озера – больше 40 м, для крупных заливов – 20 м). Наблюдается связь содержания волокон с параметрами донных осадков. Термохалинная структура влияет на вертикальное распределение микропластика в водном столбе, замедляя его осаждение. В озерах аккумулируются преимущественно гидродинамически тяжелые частицы: полимеры с высокой удельной плотностью, фрагменты, гранулы, пленки. Доля волокон в общем пуле микропластика в осадках озера меньше, чем в море. Озера выполняют роль фильтров, очищая поверхностные воды суши по мере их поступления в континентальные моря и Мировой океан от микропластика, становясь при этом их первичным накопителем.

Ключевые слова: микропластик, загрязнение, донные отложения, Онежское озеро, Балтийское море

DOI: 10.31857/S0869607121040054

ВВЕДЕНИЕ

Пластик вошел в повседневную жизнь каждого жителя Земли, служит одним из наиболее востребованных материалов и используется практически во всех областях промышленности. Его прочность, легкость и долговечность в сочетании с низкой себестоимостью делают этот материал практически незаменимым при производстве широкого круга изделий бытового назначения, в строительстве и на производстве. Вместе с тем эти свойства создают повышенный экологический риск при неправильной утилизации пластиков. К тому же, низкая стоимость при производстве провоцирует небрежное отношение к “одноразовым” пластиковым предметам со стороны потребителей.

Общемировой выпуск пластика по разным оценкам составляет порядка 275–340 млн т/год [35, 57, 58], в то время как масштабы утилизации и переработки пластиков несоизмеримо меньше. В Европе на утилизацию и вторичную переработку отправляется около 70% пластиковых отходов [57], в среднем в мире – 20% [29]. При этом в России перерабатывается не более 3–4% пластиковых отходов, а остальная часть захоранивается на полигонах или неорганизованных свалках [37].

Попавшие в природные условия пластиковые изделия постепенно разрушаются под действием УФ-излучения и механических воздействий, порождая огромное количество макро-, микро- и наночастиц, которые и несут в себе наибольшую опасность для окружающей среды [48]. Такие частицы, имеющие размер менее 5 мм, получили название “микропластик” [9, 63]. Они встречаются повсеместно: от глубин Мирового океана [64, 68] до полярных льдов [55] и удаленных горных озер [26].

Плотность большинства пластиков близка к плотности воды, поэтому синтетический мусор легко выносится с водосборной территории в озера и реки, а через них поступает в моря и Мировой океан [13, 58, 69]. Широко известным примером такого загрязнения выступает аккумуляция пластика в виде “мусорных” островов в центрах глобальных океанских круговоротов [50, 62], где концентрация микропластика (МП) достигает миллиона частиц на квадратную милю [13]. Около 12.7 млн т пластиковых отходов поступает с суши в Мировой океан ежегодно, в связи с чем пластиковый мусор был поставлен в один ряд с такими глобальными проблемами как изменение климата, закисление океана и разрушение озонового слоя [8].

Микрочастицы пластика имеют широкий размерный диапазон и могут длительное время оставаться на поверхности воды или в водном столбе, в результате чего многие живые организмы воспринимают их как источник пищи [19, 25]. Поскольку пластик не разлагается их ферментативной системой, само по себе проглатывание пластика представляет для них угрозу и может вызывать летальный исход [19, 25]. Однако наибольшее беспокойство вызывает тот факт, что частицы МП способны адсорбировать на своей поверхности многие загрязняющие вещества: тяжелые металлы [10], ПХБ [22], ДДТ, ПАУ и другие стойкие органические и неорганические загрязнители [27, 36], становясь их вторичным источником и проводником в тела водных организмов. Загрязняющие вещества, ассимилированные из пластиков, продвигаясь вверх по пищевой цепи, могут концентрироваться как в высших хищниках, так и в организме человека [34].

Поскольку воды суши относятся к основному источнику пластикового загрязнения Мирового океана [28], а также сами, являясь стратегическими водными ресурсами, подвержены влиянию этого нового загрязняющего вещества [32], изучение закономерностей его распространения в поверхностных водах весьма актуально.

СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проблемы, связанные с загрязнением водной среды частицами полимеров, привлекли интерес широкой научной общественности сравнительно недавно [28, 51, 62].

Основное внимание сейчас сосредоточено на загрязнении МП морей и Мирового океана, в то время как изучение вод суши находится в зачаточном состоянии [66], несмотря на то, что именно они могут являться одними из основных источников этого загрязнения для Мирового океана [13].

В настоящее время пилотные исследования МП в поверхностных водах и донных осадках проведены всего на нескольких озерах (Великие Американские озера Верхнее, Гурон, Эри; Женевское и Гарда в Европе; Хубсугул, в Монголии) и крупных реках (Дунай, Эльба, Мозель, Неккар, Рейн в Европе; Сан-Лоуренс и Лос-Анджелес в США) [21, 20]. Недостаток информации об этом новом виде загрязнения в поверхностных водах суши затрудняет оценку рисков для окружающей среды и требует проведения как мониторинговых исследований с целью установления количества МП, находящегося в поверхностных водах, так и поисковых исследований для обнаружения источников его поступления и путей распространения [66].

Также до сих пор непонятно, какой вклад вносит речной сток в общее загрязнение МП, однако очевидно, что реки являются важными проводниками этого загрязнения в моря [71]. Например, установлено, что в течение трех дней более двух миллионов частиц было вынесено со стоком двух рек Лос-Анджелеса [49], а Дунай выносит в Черное море более 1500 т пластиковых частиц в год [43]. Учитывая легкость пластиков и маленький размер частиц, количество их получается колоссальным.

На основе опубликованных данных построена глобальная модель выноса пластика со стоком рек [42] и оценено, что в год в Мировой океан поступает от 1.15 до 2.41 млн т пластиковых отходов. Авторами [42] выявлена прямая связь между плотностью населения, объемом производства пластика и выносом пластиковых отходов, а также сильная неравномерность распределения выноса по сезонам: около 74% пластика сбрасывается в океан в период с мая по октябрь, а первые 20 наиболее загрязненных рек мира, в основном протекающие в Азии, вносят около 67% от общего загрязнения Мирового океана полимерами. Однако авторами также отмечается высокая консервативность предложенной модели [42], обусловленная недостатком натурных данных, особенно по азиатскому региону, который является основным источником поступления пластиковых отходов в Мировой океан. Также в модели полностью отсутствуют данные по выносу пластика со стоком северных рек. Отмечается острая необходимость проведения детальных мониторинговых исследований на реках с использованием унифицированных протоколов отбора и обработки проб, выявления роли плотин и болот в процессах транспорта пластиков. Это в дальнейшем позволит более точно определить глобальный баланс пластиковых отходов, поступающих в Мировой океан. Следует отметить, что модель оценивает массу пластиковых отходов, которая наиболее велика для крупных пластиковых фрагментов, тогда как экологический вред пластикового мусора возрастает по мере уменьшения его размера и максимален для микро- и нанопластика [41].

Исследования, проведенные в Финском заливе Балтийского моря, показали, что основным источником поступления МП в залив является сток р. Невы [6]. Однако реки являются не только проводниками этого загрязнения. Модели переноса МП [12, 52] и натурные исследования речных осадков [16, 39] показали, что некоторая его часть задерживается в речных системах в результате осаждения, агрегирования с органическим и минеральным веществом и биообрастания, что говорит о том, что пресноводные системы сами по себе подвержены влиянию этого загрязнителя [66].

Ливневые и дренажные воды могут являться основным источником МП, приносимого с водосбора [71]: наибольшие количества МП обнаруживались во время сезона дождей в устьях рек [31, 40, 49, 51, 65, 70]; также высокие количества мусора наблюдались в устьях малых рек во время выпадения осадков после длительных засушливых периодов [15]. К сожалению, подобные данные пока отсутствуют для северных широт

и пока не известно, как может меняться объем выноса МП в весеннее половодье при интенсивном таянии снегов.

Недавние исследования показали, что прибрежные затопляемые территории, включая мангровые заросли [53] и солончаковые болота [67], могут быть важным накопителем МП, однако их роль в переносе этих частиц еще недостаточно исследована в связи с малым количеством натурных данных [71]. Плотная растительность заболоченных территорий может эффективно удерживать плавающий на поверхности МП [60], а высокое содержание органического вещества и избыточное увлажнение ускорять процесс обрастания частиц и их осаждение. Например, в некоторых работах отмечается, что детальные исследования болот и заболоченных территорий могут коренным образом изменить наши представления о количестве пластика, находящегося в окружающей среде [53, 71].

Первое исследование пойменных земель, проведенное в Швейцарии [59], где доля утилизации и вторичной переработки пластиков составляет около 100% и является самой высокой в мире, показали, что 90% проб почвы содержали микро- и мезопластик, хотя и в меньших количествах, нежели в донных осадках и пляжевых наносах в других районах мира. Кроме того, содержание МП в почвах речных пойм коррелировало с плотностью населения на водосборе этих рек [59].

Вопрос о стандартизации методик отбора и анализа МП стоит достаточно остро [30] и за прошедшие годы не стал менее актуальным: это подтверждают свежие публикации [20, 32, 46, 61]. В настоящее время многие исследовательские группы по всему миру пытаются разработать “стандартизированные” протоколы для отбора и обработки проб, однако пока стандартной методики не существует в связи с большим количеством различных вариантов и широким спектром региональных условий. Какие-то из методик лучше себя показывают в одних условиях, а какие-то в других. На основе исследований, проведенных с применением различной методической базы, ясно только одно: все экосистемы Земли в настоящий момент подвержены влиянию МП. Однако ввиду отсутствия общепринятых методов и географической неоднородности районов исследования на данный момент сведений о пространственном распределении этого типа загрязнения в глобальном масштабе крайне мало. Различия в протоколах и методиках между научными группами наблюдаются на всех стадиях исследования: начиная от размера ячеек сетей, используемых при отборе проб воды, и, как следствие, различных размерных диапазонов собираемых частиц пластика и их количества, до несогласованности в способах их подсчета и определения (от визуального наблюдения невооруженным глазом до применения сложных спектрометрических приборов) [75]. Репрезентативность и воспроизводимость результатов анализа также во многих случаях не ясна и усиливается неточностью описания используемых при анализе методик, например, во многих случаях даже не указывается объем пробы, взятой для анализа, или ячейки сетей, не говоря уже о внутреннем контроле качества и контроле внешнего загрязнения пробы [30].

Многие отдельные исследования посвящены загрязнению воды, пляжей, эстуариев, донных осадков, однако они не могут внести свой вклад в понимание глобальной картины загрязнения [13]. Имеются различные экспериментальные методы выделения частиц МП из природных матриц (воды, песка, донных осадков) с применением плотностного разделения и растворения органического вещества, однако в каждом конкретном случае практическая их реализация различается, начиная от выбора мест отбора, объема пробы, сепарационного раствора, способа растворения органического вещества, типов полимеров, которые рассматриваются в качестве МП и т.д. [30, 75].

Сейчас в мировой практике используется довольно много различных способов отделения частиц микропластика от естественных осадков. В основном они состоят из нескольких шагов, при которых подавляющая часть естественных осадков удаляется из пробы [75]. Они включают разложение органического вещества с применением

различных окислителей (например, перекиси водорода, щелочей или ферментов), окисления минеральных остатков и хитина (например, с помощью растворов кислот), отделения минеральных фракций с помощью плотностного разделения в насыщенных растворах солей (поливольфрамат натрия, метавольфрамат лития, формиат калия, NaJ , ZnCl_2 и др.). Выделение частиц МП из обработанных таким образом проб, как правило, проводится с помощью микроскопов специально обученным персоналом. При принятии решения — является ли частица полимерной или имеет естественное происхождение — оператор рассматриваются такие ее характеристики, как цвет, упругость при надавливании, отсутствие клеточной структуры, однородность толщины для волокон и цвета для частиц [75]. Дополнительно проводятся химические исследования состава полимера с применением ИК и рамановской спектроскопии, энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии и др. Эти приемы позволяют с высокой степенью вероятности отделить полимерные частицы от частиц природных осадков.

Различными организациями предложены локальные протоколы, например, рекомендации национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA, США) [47], однако зачастую они разрабатываются для локального применения или применения к определенным видам сред и условий, и в каждом конкретном случае возникает необходимость их адаптации под задачи каждого исследования в отдельности [20, 75], что затрудняет сравнение результатов, полученных в разных географических районах. Ранее М.Б. Зобковым и Е.Е. Есюковой [73] для определения МП в морских осадках и береговых наносах был предложен модифицированный метод NOAA [47, 23], также успешно применявшийся за рубежом для экстракции волокон, пленок и фрагментов из озерных отложений [45]. Недавно метод был несколько доработан для повышения эффективности экстракции из озерных отложений, богатых органическим веществом [74]. Несмотря на все усилия, до настоящего времени не существует ни одного стандартизированного метода, однако имеются рекомендации по его разработке [33], что можно считать позитивным шагом в этом направлении. Вместе с тем разработка некоторого стандартизированного метода определения МП в воде, морских осадках, береговых наносах и почвах является по-прежнему приоритетной задачей [54, 75].

Таким образом, исследования пресноводных систем в плане их загрязнения МП проводятся в мире только около пяти лет и находятся на начальной стадии. В связи с этим основные аспекты, изложенные в обзоре [66], остаются до сих пор актуальными. К ним можно отнести следующие не разрешенные на настоящий момент задачи: разработка эффективной методики мониторинга МП в поверхностных водах суши (1); выявление основных факторов, обуславливающих наличие, количество и пространственное распределение МП в поверхностных водах (2); понимание процесса разложения пластиковых отходов и образования МП (3); оценка роли рек в выносе частиц пластика в океан (4); оценка и понимание процессов взаимодействия живых организмов с частицами пластиков (5); оценка влияния пластиков на качество воды, аквакультуру и водную экосистему в целом (6).

ИССЛЕДОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ МИКРОПЛАСТИКА В ДОННЫХ ОСАДКАХ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ И ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

Для изучения уровня загрязнения и процессов накопления МП в озерно-речных системах было проведено комплексное изучение его распределения в донных осадках Онежского озера (бассейн Балтийского моря) в месте впадения одного из крупнейших его притоков [72], а также сравнение полученных данных с результатами исследований, проведенных ранее в Балтийском море.

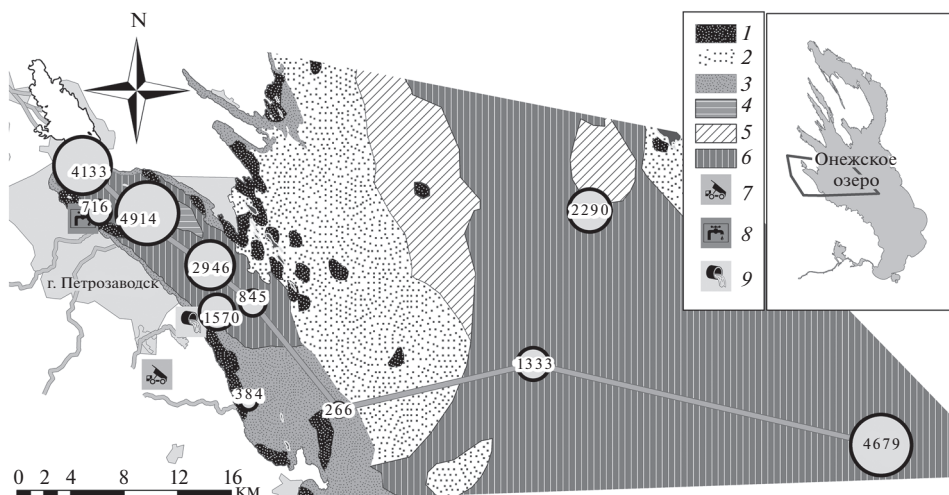


Рис. 1. Расположение станций отбора проб и содержание частиц МП (в шт./кг) в донных осадках Онежского озера. Типы донных осадков: 1 – камни, галька, гравий; 2 – осадки разной крупности; 3 – песок заиленный; 4 – крупноалевритовый ил; 5 – мелкоалевритовый ил; 6 – глинистый ил. Инфраструктура г. Петрозаводска: 7 – полигон захоронения бытовых отходов и активных илов; 8 – водозабор г. Петрозаводска; 9 – выпуск сточных вод очистных сооружений г. Петрозаводска.

Fig. 1. Sampling stations and microplastic content in Onego Lake sediments. Sediment types: 1 – rocks and cobbles; 2 – mixed sediments; 3 – fine sand; 4 – coarse silt; 5 – fine silt; 6 – clay with silt. Infrastructure of Petrozavodsk city: 7 – waste dump; 8 – water supply station; 9 – waste water treatment plant.

Онежское озеро (рис. 1) является вторым по величине озером Европы с объемом воды 295 км^3 , средней глубиной 30 м и максимальной 120 м, площадью поверхности 9720 км^2 и водосборной территорией 53100 км^2 , урезом воды 33 м н. у. м. [4]. Исследования проводились в районе впадения в озеро р. Шуя, второго по величине водосбора и годовому объему притока Онежского озера [4]. Население водосбора реки составляет около 21 тыс. человек, а г. Петрозаводска, расположенного на побережье озера, – около 280 тыс. человек. Таким образом, на изучаемой территории сосредоточено около трех четвертей населения всего водосбора озера (412 тыс. человек).

Пробы донных отложений отбирались летом 2018 и 2019 гг. в северо-западной части озера – в устье р. Шуя, Петрозаводской губе и открытой части озера (рис. 1). Поверхностный слой осадков толщиной 5 см отбирался дночерпателем Петерсона и коробчатым дночерпателем (Hydrobios).

Содержание МП в осадках анализировалось методом [74]. Частицы МП определяли с помощью микроскопа с увеличением $40\times$. Эффективность экстракции и уровень внешнего загрязнения оценивался по [73]. Антропогенное происхождение выбранных случайным образом частиц подтверждалось с помощью рамановской спектроскопии с использованием спектрометра Nicolet Almega XR.

Частицы МП были обнаружены во всех пробах. Содержание частиц в пробах сильно варьировало между станциями отбора и в среднем составило 2189 ± 1164 шт./кг сухого веса. Были выявлены две отделенные друг от друга зоны аккумуляции МП. Первая зона находится внутри Петрозаводской губы с наибольшим содержанием МП возле устья р. Шуя и расположена рядом с зоной седиментации и глубинами более 20 м. Далее по разрезу содержание МП уменьшается по мере приближения к промежуточ-

ной зоне размыва осадков между Петрозаводской губой и открытой частью озера. Вторая зона аккумуляции расположена в открытой части озера, при этом отмечено увеличение содержания МП по мере удаления от губы по разрезу.

Методы анализа МП в Онежском озере соответствуют исследованиям, проведенным на Балтийском море [24], что впервые позволяет сравнить его содержание в донных осадках континентального моря и крупного озера на его водосборе. По данным [24] среднее содержание МП в осадках Балтийского моря — 876 ± 393 шт./кг. В Онежском озере оно как минимум в два раза выше и данное различие статистически значимо (Mann-Whitney U-test, $p = 3.4 \times 10^{-3} < 0.01$; $U = 127.0$; $z = 2.9$). В зонах осадконакопления Балтийского моря (Гданьская, Борнхольмская, Готландская впадины) среднее содержание частиц МП составляет 962 ± 450 шт./кг ($p = 0.05$; $n = 7$). В зонах осадконакопления Онежского озера, на станциях С1 и С2, оно от двух до пяти раз выше (рис. 1).

Учитывая существенную разницу в численности населения водосборов Онежского озера (412 тыс. чел.) и Балтийского моря (80 млн чел), такое различие на первый взгляд кажется странным [72]. Вместе с тем в работе [5] отмечается важная роль донных осадков озер в процессах накопления МП.

Так, важным отличием полимерного состава микрочастиц, найденных в озере, по результатам рамановской спектроскопии является преобладание полимеров (79%) с плотностью выше плотности пресной воды [72]. На захоронение в донных осадках полимеров, чья удельная плотность ниже, чем у воды (полиэтилен, полипропилен и др.), влияют такие процессы, как биообрастание и агрегация с минеральным веществом. Так, в пробах воды и донных осадках Онежского озера с применением SEM-EDS выявлено биообрастание частиц полимеров диатомовыми водорослями (в частности, *Aulacoseira islandica*), а также сорбция тяжелых элементов с образованием микрокристаллов на поверхности и в объеме микрочастицы (рис. 2).

Частицы МП транспортируются в тех же гидродинамических условиях, что и частицы естественных осадков, однако они имеют гораздо более сложную форму (фрагменты, пленки, волокна, гранулы и др.), что отражается на скорости их осаждения [38], и более низкую удельную плотность ($0.8\text{--}1.6$ г/см³), чем минеральные осадки (~ 2.6 г/см³). Это оказывает существенное влияние на пространственное распределение их форм в водной среде. Наиболее распространенными формами МП в донных осадках и воде являются волокна (рис. 3): обычно их толщина составляет 5–50 мкм. Так, в воде Балтийского моря (водный столб) их доля составляет 89% [76], в морских осадках — 74.5% [24], а в озерных — 61% [72]. Волокна оседают медленно [38] и легко переносятся течениями [11]: они распространены повсеместно, поэтому в основном связь с параметрами осадка удается установить для волокон.

В донных осадках Онежского озера выявлены прямые связи содержания волокон с долей среднеалевритовой фракции (10–50 мкм), естественной влажностью, потерей при прокаливании (550°C), и обратные связи — с долей мелкозернистого песка (100–250 мкм), зольностью и плотностью осадка [72]. Связь содержания волокон в осадке с долей мелкозернистых фракций также была установлена и в Балтийском море (фракции 4–63 и 0–4 мкм). Кроме этого, было выявлено увеличение содержания волокон с уменьшением среднего диаметра частиц осадка.

Эти результаты показывают, что микроволокна с удельной плотностью от 0.8 до 1.6 г/см³ и размером от 0.2 до 5 мм в морской и пресной воде аккумулируются идентично, совместно с мелкоалевритовыми фракциями минерального осадка, при этом в озере их содержание возрастает по мере увеличения доли органических веществ в осадке [72]. Объясняться это может как физическими закономерностями (скоростью оседания частиц различной формы и плотности), так и физико-химическими — содер-

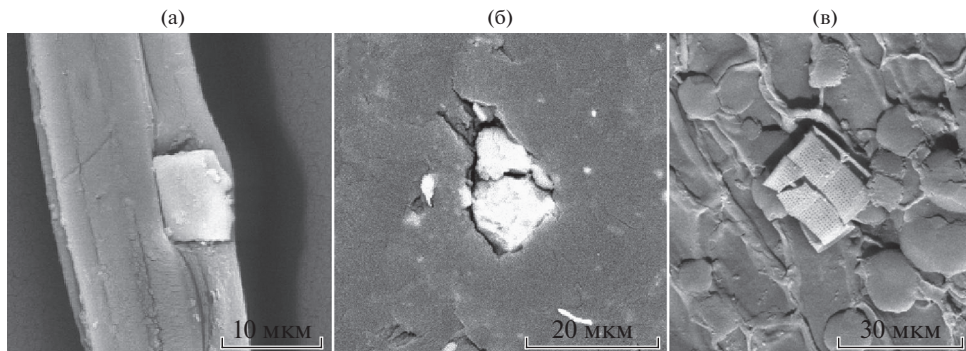


Рис. 2. Электронномикроскопические (SEM) изображения поверхности пластиков: а – волокно с растущим микрокристаллом; б – фрагмент полимера с образовавшимся минеральным включением, вызвавшим разрыв пластика (трещины в области включения); в – частица МП с прикрепленной к ее поверхности диатомовой водорослью. Большая удельная плотность включений и диатомеи (кремнистый панцирь) определяют увеличение интегральной плотности МП.

Fig. 2. Submicroscopical (SEM) images of surface of microplastic specimens. а – fiber with microcrystal growth in its body; б – plastic fragment with mineral inclusions in the material, caused polymer fracturing; в – plastic fragment with diatom algae attached to surface. High specific density of inclusions and diatom algae (silica shell) cause increase in bulk specific density of microplastics.

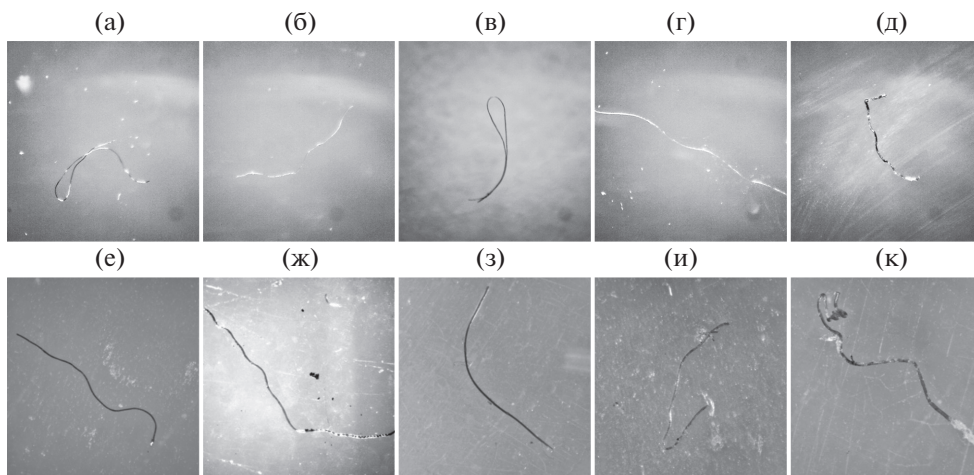


Рис. 3. Примеры волокон, извлеченных из донных осадков Балтийского моря (а – фиолетовое, б – оранжевое, в – голубое, г – красное, д – синее) и Онежского озера (е – черное, ж – красное, з – синее, и – бежевое, к – бежевое).

Fig. 3. Fibers specimens extracted from sediments of the Baltic Sea (а – violet, б – orange, в – cyan, г – red, д – blue) and Onego Lake (е – black, ж – red, з – blue, и – beige, к – beige).

жанием органического вещества в осадке, которое так же может влиять на захоронение МП путем его агрегации с природными частицами и биообрастания.

Для других форм МП (пленки, фрагменты, гранулы) зависимости менее явные. Так, в Онежском озере выявлено их преимущественное накопление рядом с основными точечными источниками — устьями рек, выпуском сточных вод городских очистных сооружений [72]. Максимальное содержание фрагментов было обнаружено в приустьевой зоне р. Шуя, а пленок — рядом с выпуском хозяйственно-бытовых сточных вод г. Петрозаводска [72]. Вместе с тем, в озере отмечается накопление преимущественно полимеров с высокой удельной плотностью [72]. По всей видимости, для полимеров, чья удельная плотность еще не превысила плотность воды, накопление рядом с источниками не отмечается, поскольку по поверхности воды они могут быть далеко унесены от источника своего поступления [18]; при этом их осаждение произойдет только через некоторое время в случайном месте в результате биообрастания или агрегации с минеральным веществом. Вместе с тем, волокна из-за низкой скорости осаждения [38] довольно легко транспортируются в потоке независимо от их удельной плотности; это, в свою очередь, отражается в том, что в озерных осадках их доля меньше, чем в море. Исходя из этого, можно заключить, что в озерах преимущественно аккумулируются частицы, трудно транспортируемые в потоке (полимеры с высокой удельной плотностью, фрагменты, гранулы, пленки).

Влияние гидродинамических условий на распределение частиц МП отражается и на расположении зон аккумуляции: так, в крупных заливах Онежского озера зоны аккумуляции мелкозернистых осадков расположены на глубинах более 20 м, в открытой части — 40 м, в то время как в Балтийском море — 80 м и более. На этих же участках наблюдается и аккумуляция микроволокон. Вместе с тем, в Балтийском море на накопление МП в осадках очевидно влияет и термохалинная структура: неравномерность поля плотности воды, вызванная поступлением более соленых вод Атлантического океана с юго-запада и речных пресных вод с северо-востока, отражающаяся в сложной вертикальной стратификации слоев распресненных и солоноватых вод, а также изменением их плотности в результате вертикального прогрева [76].

Онежское озеро — крупный пресноводный водоемом бореальной зоны, и впадающие в него реки выносят около 300 тыс. т. органического углерода в год [7]. Марганец и железо также поступают с водосбора озера в составе гумусовых веществ, составляющих до 81% от общего содержания органического вещества [1]. Так, около 8700 т железа и 870 т марганца захоранивается в Онежском озере ежегодно [2, 3]. Ранее было показано, что коллоиды железа и марганца, фульвовых и гуминовых кислот способны интенсифицировать осаждение частиц МП [14, 17, 44, 56]. Эти физико-химические процессы также должны оказывать непосредственное влияние на аккумуляцию частиц МП в осадках.

Таким образом, существенное различие в содержании МП в донных осадках континентального моря и крупного озера на его водосборе обусловлено сочетанием двух факторов: различия в гидродинамических условиях накопления и переноса МП, а также близость озера к источникам загрязнения.

ВЫВОДЫ

Впервые проведено сравнение содержания МП в донных осадках континентального моря и крупного озера на единой методической основе. Выявлено, что волокна являются наиболее распространенной формой МП как в Балтийском море, так и в Онежском озере. В донных осадках волокна аккумулируются преимущественно в зонах осадконакопления с низкой гидродинамической активностью (для Балтийского моря — глубины больше 80 м, для открытой части Онежского озера — больше 40 м). Наблюдается связь содержания волокон с параметрами донных осадков. По мере

уменьшения среднего диаметра частиц осадка содержание волокон в нем увеличивается. Термохалинная структура влияет на вертикальное распределение МП в водном столбе, замедляя его осаждение. В озерах преимущественно аккумулируются частицы, трудно транспортируемые в потоке (полимеры с высокой удельной плотностью, фрагменты, гранулы, пленки). Доля волокон в общем пуле МП в осадках озера меньше, чем в море. Процессы трансформации гумусовых веществ, соединений железа и марганца в крупных бореальных озерах также могут оказывать значимое влияние на накопление МП в донных осадках и самоочищение вод. Таким образом, озера выполняют роль фильтров, очищая поверхностные воды суши от МП по мере их поступления в континентальные моря и Мировой океан, становясь при этом их первичным накопителем.

В дальнейшем требуется подробное изучение не только уровня загрязнения морских и поверхностных вод частицами МП, но и закономерностей их образования, поступления, переноса и захоронения, а также прогнозирования последствий такого загрязнения для водных экосистем. Крупные озера — Онежское и Ладожское — вмещают около 70% пресной воды Европейской территории России и являются стратегическим водным запасом страны. В этой связи наравне с изучением этого нового типа загрязнения в морской среде необходимо уделить и повышенное внимание поверхностным водам суши. Прогресс в этом направлении может быть достигнут только с использованием прочной научной базы и в результате совместных усилий законодательных и нормоустанавливающих органов на международном, национальном и региональном уровнях. Безусловно, новые научные исследования необходимы в этом вопросе для принятия обоснованных управленческих решений и создания новой нормативной базы. В этой связи необходимо всестороннее изучение и понимание новых угроз, которые представляет распространение МП в поверхностных водах суши.

Статья подготовлена при финансовом обеспечении федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (ИВПС КарНЦ РАН). Исследования содержания МП в донных осадках Онежского озера проведены при поддержке гранта РНФ № 19-17-00035. Исследования содержания МП в донных осадках Балтийского моря проведены при поддержке гранта РНФ 19-17-00041.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефремова Т.А., Зобкова М.В. Содержание, распределение и соотношение основных компонентов органического вещества в Онежском озере // Труды КарНЦ РАН. 2019. № 9. С. 60–75.
<https://doi.org/10.17076/lim1017>
2. Кулик Н.В., Белкина Н.А., Ефременко Н.А. Поступление, трансформация и распределение марганца в Онежском озере // Московский экономический журн. 2020. № 1.
<https://doi.org/10.24411/2413-046X-2020-10063>
3. Лозовик П.А., Кулик Н.В., Ефременко Н.А. Литофильные элементы и тяжелые металлы в Онежском озере: источники поступления, содержание и трансформация // Труды КарНЦ РАН. 2020. № 4. С. 62–74.
<https://doi.org/10.17076/lim1189>
4. Онежское озеро. Атлас / Отв. ред. Н.Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ, 2010. 151 с.
5. Поздняков Ш.Р., Иванова Е.В. Оценка концентраций частиц микропластика в воде и донных отложениях Ладожского озера // Региональная экология. 2018. № 4. С. 48–52.
<https://doi.org/10.30694/1026-5600-2018-4-48-52>
6. Поздняков Ш.Р., Иванова Е.В., Гузева А.В., Шалунова Е.П., Мартинсон К.Д., Тихонова Д.А. Исследование содержания частиц микропластика в воде, донных отложениях и грунтах прибрежной территории Невской губы Финского залива // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 4. С. 411–420.
<https://doi.org/10.31857/S0321059620040148>
7. Сабылина А.В. Поступление в Онежское озеро органического углерода, общего фосфора и общего азота с речным стоком и вынос с водами реки Свири в 1965–2008 гг. // Труды

- КапНЦ РАН. 2016. № 9. С. 68–77.
<https://doi.org/10.17076/lim307>
8. Amaral-Zettler L.A., Zettler E.R., Slikas B., Boyd G.D., Melvin D.W., Morrall C.E., Proskurowski G., Mincer T.J. The biogeography of the Plastisphere: implications for policy // *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2015. V. 13(10). P. 541–546.
[https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00114-X](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00114-X)
 9. Andrady A.L. Microplastics in the marine environment // *Mar. Pollut. Bull.* 2011. V. 62(8). P. 1596–1605.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030>
 10. Ashton K., Holmes L., Turner A. Association of metals with plastic production pellets in the marine environment // *Mar. Pollut. Bull.* 2010. V. 60. P. 2050–2055.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.07.014>
 11. 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.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.185>
 12. Besseling E., Quik J.T., Sun M., Koelmans A.A. Fate of nano- and microplastic in freshwater systems: A modeling study // *Environ. Pollut.* 2017. V. 220. P. 540–548.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.10.001>
 13. Browne M.A., Crump P., Niven S.J., Teuten E., Tonkin A., Galloway T., Thompson R. Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks // *Environ SciTechnol.* 2011. V. 45. P. 9175–9179.
<https://doi.org/10.1021/es201811s>
 14. Cai L., Hu L., Shi H., Ye J., Zhang Y., Kim H. Effects of inorganic ions and natural organic matter on the aggregation of nanoplastics // *Chemosphere*. 2018. V. 197. P. 142–151.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.01.052>
 15. Carson H.S., Lamson M.R., Nakashima D., Toloum D., Hafner J., Maximenko N., McDermid K.J. Tracking the sources and sinks of local marine debris in Hawai // *Mar. Environ. Res.* 2013. V. 84. P. 76–83.
<https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2012.12.002>
 16. Castañeda R.A., Avlijas S., Simard M.A., Ricciardi A. Microplastic pollution in St. Lawrence river sediments // *Canadian J. Fisheries and Aquatic Sciences*. 2014. V. 71(12). P. 1767–1771.
<https://doi.org/10.1139/cjfas-2014-0281>
 17. Chen W., Ouyang Z.Y., Qian C., Yu H.Q. Induced structural changes of humic acid by exposure of polystyrene microplastics: A spectroscopic insight // *Environ. Pollut.* 2018. V. 233. P. 1–7.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.10.027>
 18. Chubarenko I., Bagaev A., Zobkov M., Esiukova E. On some physical and dynamical properties of microplastic particles in marine environment // *Mar. Pollut. Bull.* 2016. V. 108. P. 105–112.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.04.048>
 19. Cole M., Webb H., Lindeque P.K., Fileman E.S., Halsband C., Galloway T.S. Isolation of microplastics in biota-rich seawater samples and marine organisms // *Sci. Rep.* 2014. V. 4. P. 4528.
<https://doi.org/10.1038/srep04528>
 20. Dris R., Imhof H., Sanchez W., Gasperi J., Galgani F., Tassin B., Laforsch C. Beyond the ocean: contamination of freshwater ecosystems with (micro-) plastic particles // *Environ. Chem.* 2015. V. 2(5). P. 539–550.
<https://doi.org/10.1071/EN14172>
 21. Eerkes-Medrano D., Thompson R.C., Aldridge D.C. Microplastics in freshwater systems: a review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs // *Water research*. 2015. V. 75. P. 63–82.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.02.012>
 22. Endo S., Takizawa R., Okuda K., Takada H., Chiba K., Kanehiro H., Ogi H., Yamashita R., Date T. Concentration of polychlorinated biphenyls (PCBs) in beached resin pellets: variability among individual particles and regional differences // *Mar. Pollut. Bull.* 2005. V. 50(10). P. 1103–1114.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2005.04.030>
 23. Esiukova E. Plastic pollution on the Baltic beaches of Kaliningrad region, Russia // *Mar. Pollut. Bull.* 2017. V. 114(2). P. 1072–1080.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.10.001>
 24. Esiukova E., Zobkov M., Chubarenko I. Data on microplastic contamination of the Baltic Sea bottom sediment samples in 2015–2016 // *Data in brief*. 2020. V. 28. P. 104887.
<https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104887>

25. Fendall L.S., Sewell M.A. Contributing to marine pollution by washing your face: Microplastic in facial cleansers // *Mar. Pollut. Bull.* 2009. V. 58. P. 1255–1258.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.04.025>
26. Free C.M., Jensen O.P., Mason S.A., Eriksen M., Williamson N.J., Boldgiv B. High-levels of microplastic pollution in a large, remote, mountain lake // *Mar. Pollut. Bull.* 2014. V. 85(1). P. 156–163.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.06.001>
27. Frias J.P.G.L., Sobral P., Ferreira A.M. Organic pollutants in microplastics from two beaches of the Portuguese coast // *Mar. Pollut. Bull.* 2010. V. 60(11). P. 1988–1992.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.07.030>
28. GESAMP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection): Proceedings of the GESAMP international workshop on micro-plastic particles as a vector in transporting persistent, bio-accumulating and toxic substances in the oceans // *GESAMP Reports & Studies*. T. Bowmer, P. Kershaw (eds.). Paris: UNESCO-IOC, 2010. 68 p. https://www.marinelittersolutions.com/wp-content/uploads/2016/03/GESAMP_Workshop_on_Microplastics.pdf
29. Geyer R., Jambeck J.R., Law K.L. Production, use, and fate of all plastics ever made // *Sci. Adv.* 2017. V. 3(7). P. e1700782.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
30. 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.
<https://doi.org/10.1021/es2031505>
31. Hitchcock J.N., Mitrovic S.M. Microplastic pollution in estuaries across a gradient of human impact // *Environ. Pollut.* 2019. V. 247. P. 457–466.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.01.069>
32. Horton A.A., Walton A., Spurgeon D.J., Lahive E., Svendsen C. Microplastics in freshwater and terrestrial environments: evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities // *Sci. Total Environ.* 2017. V. 586. P. 127–141.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.190>
33. ISO-TR-21960-2020. Plastics – Environmental aspects – State of knowledge and methodologies.
34. Ivar do Sul J.A.I., Costa M.F. Marine debris review for Latin America and the wider Caribbean region: from the 1970s until now, and where do we go from here? // *Mar. Pollut. Bull.* 2007. V. 54(8). P. 1087–1104.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.05.004>
35. Jambeck J., Geyer R., Wilcox C., Siegler T.R., Perryman M., Andrady A.L., Narayan R., Law K.L. Plastic waste inputs from land into the ocean // *Science*. 2015. V. 347. P. 768–771.
<https://doi.org/10.1126/science.1260352>
36. Karapanagioti H.K., Klontza I. Testing phenanthrene distribution properties of virgin plastic pellets and plastic eroded pellets found on Lesbos island beaches (Greece) // *Mar. Environ. Res.* 2008. V. 5(4). P. 283–290.
<https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2007.11.005>
37. Kasyanenko T., Filimonov O. Recycling polyethylene terephthalate (PET) packaging as the basis of economic projects and solution of social and environmental problems in Russia // *J. Modern Accounting and Auditing*. 2013. V. 9(8). P. 1093.
38. Khatmullina L., Isachenko I. Settling velocity of microplastic particles of regular shapes // *Mar. Pollut. Bull.* 2017. V. 114(2). P. 871–880.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.11.024>
39. Klein S., Worch E., Knepper T.P. Occurrence and spatial distribution of microplastics in river shore sediments of the Rhine-Main area in Germany // *Environ. Sci. Technol.* 2015. V. 49(10). P. 6070–6076.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00492>
40. Lattin G.L., Moore C.J., Zellers A.F., Moore S.L., Weisberg S.B. A comparison of neustonic plastic and zooplankton at different depths near the southern California shore // *Mar. Pollut. Bull.* 2004. V. 49(4). P. 291–294.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2004.01.020>
41. Law K.L., Thompson R.C. Microplastics in the seas // *Science*. 2014. V. 345(6193). P. 144–145.
<https://doi.org/10.1126/science.1254065>
42. Lebreton L.C., Van Der Zwet J., Damsteeg J.W., Slat B., Andrady A., Reisser J. River plastic emissions to the world's oceans // *Nat. commun.* 2017. V. 8. P. 15611.
<https://doi.org/10.1038/ncomms15611>
43. Lechner A., Keckeis H., Lumesberger-Loisl F., Zens B., Krusch R., Tritthart M., Glas M., Schludermann E. The Danube so colourful: a potpourri of plastic litter outnumbers fish larvae in Europe's

- second largest river // *Environ. Pollut.* 2014. V. 188. P. 177–181.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.02.006>
44. *Leiser R., Wu G.M., Neu T.R., Wendt-Potthoff K.* Biofouling, metal sorption and aggregation are related to sinking of microplastics in a stratified reservoir // *Water Research*. 2020. P. 115748.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115748>
 45. *Lenaker P.L., Corsi S.R., Mason S.A.* Spatial Distribution of Microplastics in Surficial Benthic Sediment of Lake Michigan and Lake Erie // *Environ. Sci. Technol.* December 2020. P. A–L.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.0c06087>
 46. *Mai L., Bao L.J., Shi L., Wong C.S., Zeng E.Y.* A review of methods for measuring microplastics in aquatic environments // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2018. V. 25(12). P. 11319–11332.
<https://doi.org/10.1007/s11356-018-1692-0>
 47. *Masura J., Baker J.E., Foster G.D., Arthur C., Herring C.* Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments. 2015. https://marinedebris.noaa.gov/sites/default/files/publications-files/noaa_microplastics_methods_manual.pdf
 48. *Moore C.J.* Synthetic polymers in the marine environment: a rapidly increasing, long-term threat // *Environ. Res.* 2008. V. 108(2). P. 131–139.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2008.07.025>
 49. *Moore C.J., Lattin G.L., Zellers A.F.* Quantity and type of plastic debris flowing from two urban rivers to coastal waters and beaches of Southern California // *Revista de Gestão Costeira Integrada-J. Integrated Coastal Zone Management*. 2011. V. 11(1). P. 65–73. <https://www.redalyc.org/pdf/3883/388340132008.pdf>
 50. *Moore C.J., Moore S.L., Leecaster M.K., Weisberg S.B.* A comparison of plastic and plankton in the North Pacific central gyre // *Mar. Pollut. Bull.* 2001. V. 42(12). P. 1297–1300.
[https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00114-X](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00114-X)
 51. *Moore C.J., Moore S.L., Weisberg S.B., Lattin G.L., Zellers A.F.* A comparison of neustonic plastic and zooplankton abundance in southern California's coastal waters // *Mar. Pollut. Bull.* 2002. V. 44(10). P. 1035–1038.
[https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00150-9](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00150-9)
 52. *Nizzetto L., Bussi G., Futter M.N., Butterfield D., Whitehead P.G.* A theoretical assessment of microplastic transport in river catchments and their retention by soils and river sediments // *Environ. Sci.: Processes Impacts*. 2016. V. 18(8). P. 1050–1059.
<https://doi.org/10.1039/C6EM00206D>
 53. *Nor N.H.M., Obbard J.P.* Microplastics in Singapore's coastal mangrove ecosystems // *Mar. Pollut. Bull.* 2014. V. 79(1–2). P. 278–283.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.11.025>
 54. *Nuelle M.T., Dekiff J.H., Remy D., Fries E.* A new analytical approach for monitoring microplastics in marine sediments // *Environ. Pollut.* 2014. V. 184. P. 161–169.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.07.027>
 55. *Obbard R.W., Sadri S., Wong Y.Q., Khitun A.A., Baker I., Thompson R.C.* Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice // *Earth's Future*. 2014. V. 2(6). P. 315–320.
<https://doi.org/10.1002/2014EF000240>
 56. *Oriekhova O., Stoll S.* Heteroaggregation of nanoplastic particles in the presence of inorganic colloids and natural organic matter // *Environ. Sci.: Nano*. 2018. V. 5(3). P. 792–799.
<https://doi.org/10.1039/C7EN01119A>
 57. *Plastics Europe.* Plastics – the Facts 2017. https://www.plasticseurope.org/application/files/5715/1717/4180/Plastics_the_facts_2017_FINAL_for_website_one_page.pdf
 58. *Rillig M.C.* Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? // *Environ. Sci. Technol.* 2012. V. 46. P. 6453–6454.
<https://doi.org/10.1021/es302011r>
 59. *Scheurer M., Bigalke M.* Microplastics in Swiss floodplain soils // *Environ. Sci. Technol.* 2018. Vol. 52(6). P. 3591–3598.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.7b06003>
 60. *Sutton R., Mason S.A., Stanek S.K., Willis-Norton E., Wren I.F., Box C.* Microplastic contamination in the San Francisco Bay, California, USA // *Mar. Pollut. Bull.* 2016. V. 109(1). P. 230–235.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.05.077>
 61. *Syberg K., Khan F.R., Selck H., Palmqvist A., Banta G.T., Daley J., Sano L., Duhaime M.B.* Microplastics: addressing ecological risk through lessons learned // *Environ. Toxicol. Chem.* 2015. V. 34(5). P. 945–953.
<https://doi.org/10.1002/etc.2914>

-
62. Thompson R.C., Olsen Y., Mitchell R.P., Davis A., Rowland S.J., John A.W., McGonigle D., Russell A.E. Lost at sea: where is all the plastic? // *Science* (Washington). 2004. V. 304(5672). P. 838. https://www.researchgate.net/profile/Steven_Rowland/publication/8575062_Lost_at_Sea_Where_Is_All_the_Plastic/links/0fcfd51001f3893f44000000/Lost-at-Sea-Where-Is-All-the-Plastic.pdf
63. UNEP. Plastic in Cosmetics. 2015. 33 p. <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/21754/PlasticinCosmetics2015Factsheet.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
64. Van Cauwenberghe L., Vanreusel A., Mees J., Janssen C.R. Microplastic pollution in deep-sea sediments // *Environ. Pollut.* 2013. V. 182. P. 495–499. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.08.013>
65. Veerasingam S., Mugilarasan M., Venkatachalapathy R., Vethamony P. Influence of 2015 flood on the distribution and occurrence of microplastic pellets along the Chennai coast, India // *Mar. Pollut. Bull.* 2016. V. 109(1). P. 196–204. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.05.082>
66. Wagner M., Scherer C., Alvarez-Muñoz D., Brennholt N., Bourrain X., Buchinger S., Fries E., Grosbois C., Klasmeier J., Marti T., Rodriguez-Mozaz S., Urbatzka R., Vethaak D., Winther-Nielsen M., Reifferscheid G. Microplastics in freshwater ecosystems: what we know and what we need to know // *Environ. Sci. Europe*. 2014. V. 26(1). P. 1–9. <https://doi.org/10.1186/s12302-014-0012-7>
67. Weinstein J.E., Crocker B.K., Gray A.D. From macroplastic to microplastic: degradation of high-density polyethylene, polypropylene, and polystyrene in a salt marsh habitat // *Environ. Toxicol. Chem.* 2016. V. 35(7). P. 1632–1640. <https://doi.org/10.1002/etc.3432>
68. Woodall L.C., Sanchez-Vidal A., Canals M., Paterson G.L., Coppock R., Sleight V., Calafat A., Rogers A.D., Narayanaswamy B.E., Thompson R.C. The deep sea is a major sink for microplastic debris // *R. Soc. Open Sci.* 2014. V. 1(4). P. 140317. <https://doi.org/10.1098/rsos.140317>
69. Wright S.L., Thompson R.C., Galloway T.S. The physical impacts of microplastics on marine organisms: a review // *Environ. Pollut.* 2013. V. 178. P. 483–492. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.02.031>
70. Yonkos L.T., Friedel E.A., Perez-Reyes A.C., Ghosal S., Arthur C.D. Microplastics in four estuarine rivers in the Chesapeake Bay, USA // *Environ. Sci. Technol.* 2014. V. 48(24). P. 14195–14202. <https://doi.org/10.1021/es5036317>
71. Zhang H. Transport of microplastics in coastal seas // *Estuarine, Coastal Shelf Sci.* 2017. V. 199. P. 4–86. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.09.032>
72. 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. V. 8(5). P. 104367. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104367>
73. Zobkov M., Esiukova E. Microplastics in Baltic bottom sediments: quantification procedures and first results // *Mar. Pollut. Bull.* 2017. V. 114(2). P. 724–732. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.10.060>
74. Zobkov M., Zobkova M., Galakhina N., Efremova T. Method for microplastics extraction from Lake sediments // *MethodsX*. 2020. V. 7. P. 101140. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.101140>
75. Zobkov M.B., Esiukova E.E. Microplastics in a Marine Environment: Review of Methods for Sampling, Processing, and Analyzing Microplastics in Water, Bottom Sediments, and Coastal Deposits // *Oceanology*. 2018. V. 58. P. 137–143. <https://doi.org/10.1134/S0001437017060169>
76. Zobkov M.B., Esiukova E.E., Zyubin A.Y., Samusev I.G. Microplastic content variation in water column: The observations employing a novel sampling tool in stratified Baltic Sea // *Mar. Pollut. Bull.* 2019. V. 138. P. 193–205. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.047>

Lakes as Accumulators of Microplastics on the Way from Land to the World Ocean: Review

M. B. Zobkov^{1, *}, I. P. Chubarenko^{2, **}, E. E. Esiukova^{2, ***}, N. A. Belkina^{1, ****},
V. V. Kovalevski^{1, 3, *****}, M. V. Zobkova^{1, *****},
T. A. Efremova^{1, *****}, and N. E. Galakhina^{1, *****}

¹*Northern Water Problems Institute of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia*

²*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

³*Institute of Geology of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia*

*E-mail: duet@onego.ru

**E-mail: irina_chubarenko@mail.ru

***E-mail: elena_esiukova@mail.ru

****E-mail: bel110863@mail.ru

*****E-mail: kovalevs@krc.karelia.ru

*****E-mail: rincalika21@yandex.ru

*****E-mail: efremova.nwpi@mail.ru

*****E-mail: kulakovanata@mail.ru

The purpose of the work is to summarize the currently available information concerning the mechanisms of microplastics transport and accumulation in the surface waters and to compare it with the continental seas in this regard. The article summarizes the data published in the foreign and Russian literature. The comparative analysis of the original materials received by the authors in the process of research in the Baltic Sea and the Onego Lake using identical methods of microplastics determination is presented, the results are compared. The main emphasis is on the ways and volumes of microplastics entering the continental seas and the World Ocean. A statistically higher amount of microplastics was found in the bottom sediments of the Onego Lake. Possible reasons for this difference were discussed. Fibers are the most common form of microplastics in the Baltic Sea and the Onego Lake. In the bottom sediments, fibers accumulate mainly in sedimentation zones with low hydrodynamic activity (in the Baltic Sea – on depths more than 80 m, in open part of the Onego Lake – on depths more than 40 m, in large bays – on 20 m). There is a connection between the fiber content and the parameters of the bottom sediments. The thermohaline structure affects the vertical distribution of microplastics in the water column, slowing its deposition. Lakes accumulate mainly hydrodynamically heavy particles: polymers with a high specific density, fragments, granules, films. The rate of fibers in the total pool of microplastics in lake sediments is less than in the sea. Lakes act as filters, purifying the surface waters from microplastics as they enter the continental seas and the World Ocean, and becoming their primary storage water bodies.

Keywords: microplastics, contamination, bottom sediments, Onego Lake, Baltic Sea

REFERENCES

1. Efremova T.A., Zobkova M.V. Soderzhanie, raspredelenie i sootnoshenie osnovnykh komponentov organicheskogo veshchestva v Onezhskom ozere // Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN. 2019. № 9. P. 60–75. DOI 10.17076/lim1017
2. Kulik N.V., Belkina N.A., Efremenko N.A. Postuplenie, transformaciya i raspredelenie margancza v Onezhskom ozere // Moskovskij ekonomicheskij zhurn. 2020. № 1. DOI 10.24411/2413-046X-2020-10063
3. Lozovik P.A., Kulik N.V., Efremenko N.A. Litofil'nye elementy i tyazhelye metally v Onezhskom ozere: istochniki postupleniya, soderzhanie i transformaciya // Trudy Karel'skogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. 2020. № 4. P. 62–74. DOI 10.17076/lim1189
4. Onezhskoe ozero. Atlas / Ott. red. N.N. Filatov. Petrozavodsk: Karel'skij nauchnyj centr RAN, 2010. 151 s.
5. Pozdnyakov Sh.R., Ivanova E.V. Ocenka koncentracij chasticz mikroplastika v vode i donnykh otlozheniyah Ladozhskogo ozera // Regional'naya ekologiya. 2018. № 4. S. 48–52. DOI 10.30694/1026-5600-2018-4-48-52

6. *Pozdnyakov Sh.R., Ivanova E.V., Guzeva A.V., Shalunova E.P., Martinson K.D., Tixonova D.A.* Issledovanie sodержaniya chasticz mikroplastika v vode, donnyh otlozheniyah i gruntah pribrezhnoj territorii Nevskoj guby Finskogo zaliva // *Vodnye resursy.* 2020. V. 47. № 4. S. 411–420. DOI 10.31857/S0321059620040148
7. *Sabylina A.V.* Postuplenie v Onezhskoe ozero organicheskogo ugleroda, obshhego fosfora i obshhego azota s rechnym stokom i vynos s vodami reki Sviri v 1965–2008 gg. // *Trudy KarNCz RAN.* 2016. № 9. S. 68–77. DOI 10.17076/lim307
8. *Amaral-Zettler L.A., Zettler E.R., Slikas B., Boyd G.D., Melvin D.W., Morrall C.E., Proskurowski G., Mincer T.J.* The biogeography of the Plasticsphere: implications for policy // *Frontiers in Ecology and the Environment.* 2015. V. 13(10). P. 541–546. DOI 10.1016/S0025-326X(01)00114-X
9. *Andrady A.L.* Microplastics in the marine environment // *Mar. Pollut. Bull.* 2011. Vol. 62(8). Pp. 1596–1605. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2011.05.030
10. *Ashton K., Holmes L., Turner A.* Association of metals with plastic production pellets in the marine environment // *Mar. Pollut. Bull.* 2010. V. 60. P. 2050–2055. DOI 10.1016/j.marpolbul.2010.07.014
11. *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
12. *Besseling E., Quik J.T., Sun M., Koelmans A.A.* Fate of nano- and microplastic in freshwater systems: A modeling study // *Environ. Pollut.* 2017. V. 220. P. 540–548. DOI 10.1016/j.envpol.2016.10.001
13. *Browne M.A., Crump P., Niven S.J., Teuten E., Tonkin A., Galloway T., Thompson R.* Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks // *Environ SciTechnol.* 2011. V. 45. P. 9175–9179. DOI 10.1021/es201811s
14. *Cai L., Hu L., Shi H., Ye J., Zhang Y., Kim H.* Effects of inorganic ions and natural organic matter on the aggregation of nanoplastics // *Chemosphere.* 2018. V. 197. P. 142–151. DOI 10.1016/j.chemosphere.2018.01.052
15. *Carson H.S., Lamson M.R., Nakashima D., Toloumu D., Hafner J., Maximenko N., McDermid K.J.* Tracking the sources and sinks of local marine debris in Hawaii // *Mar. Environ. Res.* 2013. V. 84. P. 76–83. DOI 10.1016/j.marenvres.2012.12.002
16. *Castañeda R.A., Avlijas S., Simard M.A., Ricciardi A.* Microplastic pollution in St. Lawrence river sediments // *Canadian J. Fisheries and Aquatic Sciences.* 2014. V. 71(12). P. 1767–1771. DOI 10.1139/cjfas-2014-0281
17. *Chen W., Ouyang Z.Y., Qian C., Yu H.Q.* Induced structural changes of humic acid by exposure of polystyrene microplastics: A spectroscopic insight // *Environ. Pollut.* 2018. V. 233. P. 1–7. DOI 10.1016/j.envpol.2017.10.027
18. *Chubarenko I., Bagaev A., Zobkov M., Esiukova E.* On some physical and dynamical properties of microplastic particles in marine environment // *Mar. Pollut. Bull.* 2016. V. 108. P. 105–112. DOI 10.1016/j.marpolbul.2016.04.048
19. *Cole M., Webb H., Lindeque P.K., Fileman E.S., Halsband C., Galloway T.S.* Isolation of microplastics in biota-rich seawater samples and marine organisms // *Sci. Rep.* 2014. V. 4. P. 4528. DOI 10.1038/srep04528
20. *Dris R., Imhof H., Sanchez W., Gasperi J., Galgani F., Tassin B., Laforsch C.* Beyond the ocean: contamination of freshwater ecosystems with (micro-) plastic particles // *Environ. Chem.* 2015. V. 12(5). P. 539–550. DOI 10.1071/EN14172
21. *Eerkes-Medrano D., Thompson R.C., Aldridge D.C.* Microplastics in freshwater systems: a review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs // *Water research.* 2015. V. 75. P. 63–82. DOI 10.1016/j.watres.2015.02.012
22. *Endo S., Takizawa R., Okuda K., Takada H., Chiba K., Kanehiro H., Ogi H., Yamashita R., Date T.* Concentration of polychlorinated biphenyls (PCBs) in beached resin pellets: variability among individual particles and regional differences // *Mar. Pollut. Bull.* 2005. V. 50(10). P. 1103–1114. DOI 10.1016/j.marpolbul.2005.04.030
23. *Esiukova E.* Plastic pollution on the Baltic beaches of Kaliningrad region, Russia // *Mar. Pollut. Bull.* 2017. V. 114(2). P. 1072–1080. DOI 10.1016/j.marpolbul.2016.10.001
24. *Esiukova E., Zobkov M., Chubarenko I.* Data on microplastic contamination of the Baltic Sea bottom sediment samples in 2015–2016 // *Data in brief.* 2020. V. 28. P. 104887. DOI 10.1016/j.dib.2019.104887
25. *Fendall L.S., Sewell M.A.* Contributing to marine pollution by washing your face: Microplastic in facial cleansers // *Mar. Pollut. Bull.* 2009. V. 58. P. 1255–1258. DOI 10.1016/j.marpolbul.2009.04.025
26. *Free C.M., Jensen O.P., Mason S.A., Eriksen M., Williamson N.J., Boldgiv B.* High-levels of microplastic pollution in a large, remote, mountain lake // *Mar. Pollut. Bull.* 2014. V. 85(1). P. 156–163. DOI 10.1016/j.marpolbul.2014.06.001
27. *Frias J.P.G.L., Sobral P., Ferreira A.M.* Organic pollutants in microplastics from two beaches of the Portuguese coast // *Mar. Pollut. Bull.* 2010. V. 60(11). P. 1988–1992. DOI 10.1016/j.marpolbul.2010.07.030

28. GESAMP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection): Proceedings of the GESAMP international workshop on micro-plastic particles as a vector in transporting persistent, bio-accumulating and toxic substances in the oceans // GESAMP Reports & Studies. Bowmer T., Kershaw P. (Eds.). Paris: UNESCO-IOC, 2010. 68 p. https://www.marinelittersolutions.com/wp-content/uploads/2016/03/GESAMP_Workshop_on_Microplastics.pdf
29. Geyer R., Jambeck J.R., Law K.L. Production, use, and fate of all plastics ever made // *Sci. Adv.* 2017. V. 3(7). P. e1700782. DOI 10.1126/sciadv.1700782
30. 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. DOI 10.1021/es2031505
31. Hitchcock J.N., Mitrovic S.M. Microplastic pollution in estuaries across a gradient of human impact // *Environ. Pollut.* 2019. V. 247. P. 457–466. DOI 10.1016/j.envpol.2019.01.069
32. Horton A.A., Walton A., Spurgeon D.J., Lahive E., Svendsen C. Microplastics in freshwater and terrestrial environments: evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities // *Sci. Total Environ.* 2017. V. 586. P. 127–141. DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.01.190
33. ISO-TR-21960-2020. Plastics – Environmental aspects – State of knowledge and methodologies.
34. Ivar do Sul J.A.I., Costa M.F. Marine debris review for Latin America and the wider Caribbean region: from the 1970s until now, and where do we go from here? // *Mar. Pollut. Bull.* 2007. V. 54(8). P. 1087–1104. DOI 10.1016/j.marpolbul.2007.05.004
35. Jambeck J., Geyer R., Wilcox C., Siegler T.R., Perryman M., Andrady A.L., Narayan R., Law K.L. Plastic waste inputs from land into the ocean // *Science*. 2015. V. 347. P. 768–771. DOI 10.1126/science.1260352
36. Karapanagioti H.K., Klontza I. Testing phenanthrene distribution properties of virgin plastic pellets and plastic eroded pellets found on Lesbos island beaches (Greece) // *Mar. Environ. Res.* 2008. V. 65(4). P. 283–290. DOI 10.1016/j.marenvres.2007.11.005
37. Kasyanenko T., Filimonov O. Recycling polyethylene terephthalate (PET) packaging as the basis of economic projects and solution of social and environmental problems in Russia // *J. Modern Accounting and Auditing*. 2013. V. 9(8). P. 1093.
38. Khatmullina L., Isachenko I. Settling velocity of microplastic particles of regular shapes. // *Mar. Pollut. Bull.* 2017. V. 114(2). P. 871–880. DOI 10.1016/j.marpolbul.2016.11.024
39. Klein S., Worch E., Knepper T.P. Occurrence and spatial distribution of microplastics in river shore sediments of the Rhine-Main area in Germany // *Environ. Sci. Technol.* 2015. V. 49(10). P. 6070–6076. DOI 10.1021/acs.est.5b00492
40. Lattin G.L., Moore C.J., Zellers A.F., Moore S.L., Weisberg S.B. A comparison of neustonic plastic and zooplankton at different depths near the southern California shore // *Mar. Pollut. Bull.* 2004. V. 49(4). P. 291–294. DOI 10.1016/j.marpolbul.2004.01.020
41. Law K.L., Thompson R.C. Microplastics in the seas // *Science*. 2014. V. 345(6193). P. 144–145. DOI 10.1126/science.1254065
42. Lebreton L.C., Van Der Zwet J., Damsteeg J.W., Slat B., Andrady A., Reisser J. River plastic emissions to the world's oceans // *Nat. commun.* 2017. V. 8. P. 15611. DOI 10.1038/ncomms15611
43. Lechner A., Keckeis H., Lumesberger-Loisl F., Zens B., Krusch R., Tritthart M., Glas M., Schludermann E. The Danube so colourful: a potpourri of plastic litter outnumbers fish larvae in Europe's second largest river // *Environ. Pollut.* 2014. V. 188. P. 177–181. DOI 10.1016/j.envpol.2014.02.006
44. Leiser R., Wu G.M., Neu T.R., Wendt-Potthoff K. Biofouling, metal sorption and aggregation are related to sinking of microplastics in a stratified reservoir // *Water Research*. 2020. P. 115748. DOI 10.1016/j.watres.2020.115748
45. Lenaker P.L., Corsi S.R., Mason S.A. Spatial Distribution of Microplastics in Surficial Benthic Sediment of Lake Michigan and Lake Erie // *Environ. Sci. Technol.* December 2020. P. A–L. DOI 10.1021/acs.est.0c06087
46. Mai L., Bao L.J., Shi L., Wong C.S., Zeng E.Y. A review of methods for measuring microplastics in aquatic environments // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2018. Vol. 25(12). P. 11319–11332. DOI 10.1007/s11356-018-1692-0
47. Masura J., Baker J.E., Foster G.D., Arthur C., Herring C. Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments. 2015. https://marinedebris.noaa.gov/sites/default/files/publications-files/noaa_microplastics_methods_manual.pdf
48. Moore C.J. Synthetic polymers in the marine environment: a rapidly increasing, long-term threat // *Environ. Res.* 2008. V. 108(2). P. 131–139. DOI 10.1016/j.envres.2008.07.025
49. Moore C.J., Lattin G.L., Zellers A.F. Quantity and type of plastic debris flowing from two urban rivers to coastal waters and beaches of Southern California // *Revista de Gestão Costeira Integrada-J. Integrated Coastal Zone Management*. 2011. V. 11(1). P. 65–73. <https://www.redalyc.org/pdf/3883/388340132008.pdf>

50. Moore C.J., Moore S.L., Leecaster M.K., Weisberg S.B. A comparison of plastic and plankton in the North Pacific central gyre // *Mar. Pollut. Bull.* 2001. V. 42(12). P. 1297–1300. DOI 10.1016/S0025-326X(01)00114-X
51. Moore C.J., Moore S.L., Weisberg S.B., Lattin G.L., Zellers A.F. A comparison of neustonic plastic and zooplankton abundance in southern California's coastal waters // *Mar. Pollut. Bull.* 2002. V. 44(10). P. 1035–1038. DOI 10.1016/S0025-326X(02)00150-9
52. Nizzetto L., Bussi G., Futter M.N., Butterfield D., Whitehead P.G. A theoretical assessment of microplastic transport in river catchments and their retention by soils and river sediments // *Environ. Sci.: Processes Impacts*. 2016. V. 18(8). P. 1050–1059. DOI 10.1039/C6EM00206D
53. Nor N.H.M., Obbard J.P. Microplastics in Singapore's coastal mangrove ecosystems // *Mar. Pollut. Bull.* 2014. V. 79(1–2). P. 278–283. DOI 10.1016/j.marpolbul.2013.11.025
54. Nuelle M.T., Dekiff J.H., Remy D., Fries E. A new analytical approach for monitoring microplastics in marine sediments // *Environ. Pollut.* 2014. V. 184. P. 161–169. DOI 10.1016/j.envpol.2013.07.027
55. Obbard R.W., Sadri S., Wong Y.Q., Khitun A.A., Baker I., Thompson R.C. Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice // *Earth's Future*. 2014. V. 2(6). P. 315–320. DOI 10.1002/2014EF000240
56. Oriekhova O., Stoll S. Heteroaggregation of nanoplastic particles in the presence of inorganic colloids and natural organic matter // *Environ. Sci.: Nano*. 2018. V. 5(3). P. 792–799. DOI 10.1039/C7EN01119A
57. Plastics Europe. Plastics – the Facts 2017. https://www.plasticseurope.org/application/files/5715/1717/4180/Plastics_the_facts_2017_FINAL_for_website_one_page.pdf
58. Rillig M.C. Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? // *Environ. Sci. Technol.* 2012. V. 46. P. 6453–6454. DOI 10.1021/es302011r
59. Scheurer M., Bigalke M. Microplastics in Swiss floodplain soils // *Environ. Sci. Technol.* 2018. V. 52(6). P. 3591–3598. DOI 10.1021/acs.est.7b06003
60. Sutton R., Mason S.A., Stanek S.K., Willis-Norton E., Wren I.F., Box C. Microplastic contamination in the San Francisco Bay, California, USA // *Mar. Pollut. Bull.* 2016. V. 109(1). P. 230–235. DOI 10.1016/j.marpolbul.2016.05.077
61. Syberg K., Khan F.R., Selck H., Palmqvist A., Banta G.T., Daley J., Sano L., Duhaime M.B. Microplastics: addressing ecological risk through lessons learned // *Environ. Toxicol. Chem.* 2015. V. 34(5). P. 945–953. DOI 10.1002/etc.2914
62. Thompson R.C., Olsen Y., Mitchell R.P., Davis A., Rowland S.J., John A.W., McGonigle D., Russell A.E. Lost at sea: where is all the plastic? // *Science (Washington)*. 2004. V. 304(5672). P. 838. https://www.researchgate.net/profile/Steven_Rowland/publication/8575062_Lost_at_Sea_Where_Is_All_the_Plastic/links/0fcfd51001f3893f44000000/Lost-at-Sea-Where-Is-All-the-Plastic.pdf
63. UNEP. Plastic in Cosmetics. 2015. 33 p. <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/21754/PlasticinCosmetics2015Factsheet.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
64. Van Cauwenberghe L., Vanreusel A., Mees J., Janssen C.R. Microplastic pollution in deep-sea sediments // *Environ. Pollut.* 2013. V. 182. P. 495–499. DOI 10.1016/j.envpol.2013.08.013
65. Veerasingam S., Mugilarasan M., Venkatachalapathy R., Vethamony P. Influence of 2015 flood on the distribution and occurrence of microplastic pellets along the Chennai coast, India // *Mar. Pollut. Bull.* 2016. V. 109(1). P. 196–204. DOI 10.1016/j.marpolbul.2016.05.082
66. Wagner M., Scherer C., Alvarez-Muñoz D., Brennholt N., Bourrain X., Buchinger S., Fries E., Grosbois C., Klasmeier J., Marti T., Rodriguez-Mozaz S., Urbatzka R., Vethaak D., Winther-Nielsen M., Reijnders G. Microplastics in freshwater ecosystems: what we know and what we need to know // *Environ. Sci. Eur.* 2014. V. 26(1). P. 1–9. DOI 10.1186/s12302-014-0012-7
67. Weinstein J.E., Crocker B.K., Gray A.D. From macroplastic to microplastic: degradation of high-density polyethylene, polypropylene, and polystyrene in a salt marsh habitat // *Environ. Toxicol. Chem.* 2016. V. 35(7). P. 1632–1640. DOI 10.1002/etc.3432
68. Woodall L.C., Sanchez-Vidal A., Canals M., Paterson G.L., Coppock R., Sleight V., Calafat A., Rogers A.D., Narayanaswamy B.E., Thompson R.C. The deep sea is a major sink for microplastic debris // *R. Soc. Open Sci.* 2014. V. 1(4). P. 140317. DOI 10.1098/rsos.140317
69. Wright S.L., Thompson R.C., Galloway T.S. The physical impacts of microplastics on marine organisms: a review // *Environ. Pollut.* 2013. V. 178. P. 483–492. DOI 10.1016/j.envpol.2013.02.031
70. Yonkos L.T., Friedel E.A., Perez-Reyes A.C., Ghosal S., Arthur C.D. Microplastics in four estuarine rivers in the Chesapeake Bay, USA // *Environ. Sci. Technol.* 2014. V. 48(24). P. 14195–14202. DOI 10.1021/es5036317
71. Zhang H. Transport of microplastics in coastal seas // *Estuarine, Coastal Shelf Sci.* 2017. V. 199. P. 74–86. DOI 10.1016/j.ecss.2017.09.032
72. 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. V. 8(5). P. 104367. DOI 10.1016/j.jece.2020.104367

-
73. *Zobkov M., Esiukova E.* Microplastics in Baltic bottom sediments: quantification procedures and first results // *Mar. Pollut. Bull.* 2017. V. 114(2). P. 724–732. DOI 10.1016/j.marpolbul.2016.10.060
 74. *Zobkov M., Zobkova M., Galakhina N., Efremova T.* Method for microplastics extraction from Lake sediments // *MethodsX*. 2020. V. 7. P. 101140. DOI 10.1016/j.mex.2020.101140
 75. *Zobkov M.B., Esiukova E.E.* Microplastics in a Marine Environment: Review of Methods for Sampling, Processing, and Analyzing Microplastics in Water, Bottom Sediments, and Coastal Deposits // *Oceanology*. 2018. V. 58. P. 137–143. DOI 10.1134/S0001437017060169
 76. *Zobkov M.B., Esiukova E.E., Zyubin A.Y., Samusev I.G.* Microplastic content variation in water column: The observations employing a novel sampling tool in stratified Baltic Sea // *Mar. Pollut. Bull.* 2019. V. 138. P. 193–205. DOI 10.1016/j.marpolbul.2018.11.047