

ГИДРОХИМИЯ, ГИДРОБИОЛОГИЯ,
ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

УДК 551.312:556.555.8-036.5(1-751.1)(282.247.211+282.247.211.1)

СОДЕРЖАНИЕ МИКРОПЛАСТИКА В ДОННЫХ ОСАДКАХ ОЗЕР
ОСОБО ОХРАНЯЕМЫХ ПРИРОДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ НА ПРИМЕРЕ
КИЖСКИХ ШХЕР ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА И ВОДЛОЗЕРО¹

© 2023 г. М. Б. Зобков^а, *, Т. А. Ефремова^а

^аИнститут водных проблем Севера КарНЦ РАН,
ФИЦ “Карельский научный центр РАН”, Петрозаводск, 185030 Россия

*e-mail: duet@onego.ru

Поступила в редакцию 03.08.2022 г.

После доработки 28.10.2022 г.

Принята к публикации 14.12.2022 г.

Определено содержание микропластика в донных осадках водных объектов особо охраняемых природных территорий – Водлозерского национального парка (оз. Водлозеро) и Музея-заповедника “Киж” (Кижские шхеры Онежского озера). Пробы были отобраны на четырех станциях, расположенных в Кижских шхерах Онежского озера и пяти станциях на оз. Водлозеро. Экстракция микропластика (≥ 200 мкм) из проб проводилась путем плотностного разделения. Идентификация частиц проводилась при помощи бинокулярного микроскопа. Для случайной выборки частиц проведен анализ химического состава с помощью микро-Фурье-спектрометрии. Во всех пробах обнаружен микропластик. В Кижских шхерах среднее содержание частиц составило 3413 ± 1965 шт/кг сухого веса осадка, что несколько выше, чем ранее было определено для Петрозаводской губы и открытой части Онежского озера. По данным химического анализа, на синтетические полимеры приходится 55% частиц, 21% – представлены модифицированной целлюлозой, 24% – частицы природного происхождения. Максимальное содержание микропластика обнаружено рядом с главным пассажирским причалом музея-заповедника “Киж”. Среднее содержание частиц в донных осадках оз. Водлозеро было ниже, чем в Кижских шхерах, и составило 1506 ± 845 шт/кг, из которых 81% – синтетические полимеры, 9% – модифицированная целлюлоза, 10% – полимеры природного происхождения. Меньшее содержание частиц антропогенного происхождения в оз. Водлозеро по сравнению с Кижскими шхерами согласуется с показателями посещаемости этих природных территорий туристами.

Ключевые слова: микропластик, донные осадки, особо охраняемые природные территории, Онежское озеро, Водлозеро, загрязнение, ЮНЕСКО.

DOI: 10.31857/S0321059623030148, **EDN:** CPGZDA

ВВЕДЕНИЕ

В последние несколько десятилетий в научном сообществе активно обсуждаются проблемы, связанные с загрязнением окружающей среды антропогенными полимерами [16, 22]. При этом частицы полимеров размером < 5 мм, или микропластик (МП), по мнению многих ученых, представляют собой повышенную экологическую опасность [12, 22, 24]. Из-за низкой удельной плотности по сравнению с другим антропоген-

ным мусором частицы полимеров легко выносятся с водосборной территории в озера и реки, могут переноситься на большие расстояния по поверхности воды или оставаться во взвешенном состоянии в водной среде [11, 25]. В результате биообрастания и агрегации с минеральными частицами МП осаждается и аккумулируется в донных осадках [12, 30]. В связи с этим эти частицы повсеместно обнаруживаются в донных осадках океанов, морей, озер и рек, представляя собой интегральную картину загрязнения этих территорий. Содержание МП в донных осадках увеличилось в несколько десятков раз за последние несколько десятилетий, создав новую историческую запись эпохи антропоцена [32].

Из-за малого размера частиц многие живые организмы воспринимают МП как источник пищи, что наносит вред их пищеварительной систе-

¹ Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВПС КарНЦ РАН. Полевые работы на оз. Водлозеро проведены в рамках проекта ППС “Карелия” (A5033). Аналитические работы выполнены в рамках проекта РНФ (19-17-00035). Исследования выполнены с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ “Карельский научный центр Российской академии наук”.

ме и может приводить к летальному исходу [9, 19]. Особое беспокойство вызывает тот факт, что частицы МП способны адсорбировать на своей поверхности стойкие загрязняющие вещества [14, 31], транспортируя их тем самым с полигонов захоронения отходов, отстойников сточных вод и других источников загрязнения в реки, озера и моря, становясь тем самым новым вектором распространения стойких загрязняющих веществ.

Ранее сообщалось о загрязнении морских особо охраняемых природных территорий МП в разных районах мира [23], включая Большой Барьерный риф [20] и Галапагосские о-ва [21]. Выявлено, что их загрязнение вызвано не только влиянием местного туризма и рыболовства, но и дальним переносом частиц с морскими течениями и атмосферными выпадениями, вместе с тем пресноводные экосистемы, находящиеся на особо охраняемых природных территориях, остаются практически не изученными в этом плане [23].

Северные водные экосистемы наиболее уязвимы к любым внешним воздействиям по причине медленной скорости их восстановления. Холодный климат определяет замедленный метаболизм и низкую скорость самоочищения таких экосистем. В современных условиях активного освоения Севера России, в особенности в зонах особо охраняемых территорий, крупные озера этого региона требуют постоянного контроля их состояния с целью сохранения высокого качества воды [1, 5]. Изучение уровня загрязнения водной среды, в том числе новыми типами загрязняющих веществ, таких как МП, — необходимый этап определения рекреационной емкости экосистем Севера. Особо охраняемые природные территории в этом плане относятся к зонам повышенного внимания, поскольку это — объекты общенационального достояния. В настоящее время МП не утвержден как загрязняющее вещество и не входит ни в один перечень определяемых компонентов, он не анализируется при выполнении мониторинговых исследований на акваториях, поэтому с целью понимания процессов накопления МП в донных осадках в местах с повышенной туристической нагрузкой авторами было проведено исследование содержания МП в донных осадках озер особо охраняемых природных территорий Республики Карелии: историко-архитектурного и этнографического музея-заповедника “Киж” (объект всемирного наследия ЮНЕСКО с 1990 г.) и Водлозерского национального парка (биосферный заповедник ЮНЕСКО с 2001 г.).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Музей-заповедник “Киж” расположен в северной части Онежского озера на архипелаге, получившем название Кижские (Онежские) шхеры. Основная экспозиция музея находится на одно-

именном острове. Ежегодно музей-заповедник “Киж” посещает более 160 тыс. туристов из России и зарубежья [7, 26]. На территории музея-заповедника расположено около 80 архитектурных памятников, датированных XV–XX вв., перемещенных с различных районов Республики Карелии. Буферная зона общей площадью ~10 тыс. га вокруг о. Киж включает в себя также и Кижские шхеры (один из лимнических районов Онежского озера), представляющие собой множество островов, заливов и проливов [3]. Лимнические условия Кижских шхер характеризуются их изолированностью от центрального плеса озера [15]. Этот район подвержен значительной антропогенной нагрузке за счет воздействия водного транспорта, рыбного промысла, принимает бытовые стоки как с территории музея-заповедника, так и от частных домовладений, а также с сельскохозяйственных угодий. Хотя в музее-заповеднике существует и модернизируется система раздельного сбора и вывоза бытовых отходов, на некоторых островах архипелага существуют неорганизованные свалки в прибрежной зоне [26].

Водлозерский национальный парк расположен на восточном берегу Онежского озера и покрывает площадь ~4280 км². Озеро Водлозеро, крупнейшее из 300 озер парка, имеет площадь 322 км² и среднюю глубину 2.8 м [6]. Наиболее крупный населенный пункт с населением 300 чел. — д. Куганаволок, расположенная на одноименном мысе. Круглогодично на территории парка проживает около 400 человек, летом население увеличивается до 2 тыс. чел. Ежегодно Водлозерский национальный парк посещают 4.6–5.4 тыс. туристов [26]. Через территорию парка проходит популярный среди любителей спортивного сплава маршрут (р. Илекса — оз. Водлозеро — р. Вама), развит сельский туризм, созданы все условия для активного отдыха: в парке проложены километровые тропы для пешеходных маршрутов, оборудованы стоянки, устроены информационные стенды и центры для посетителей [4]. В самом парке имеется система раздельного сбора и вывоза бытовых отходов, однако на мысе Куганаволок существует неорганизованная свалка мусора площадью ~0.3 га в ~300 м от берега оз. Водлозеро [26].

Пробы донных осадков были отобраны в районе Кижских шхер на трех станциях (Z2, Z3, Z4) в сентябре 2019 г. и на одной (Z(OT)) в июне 2020 г. (рис. 1). Станция Z2 располагалась вблизи главного пассажирского причала музея-заповедника “Киж”, принимающего крупные туристические суда, на глубине 4.1 м. Станция Z (OT) находилась рядом с домом Росгвардии, недалеко от кратчайшего водного пути от берега (Оятивщина) до о. Киж на глубине 6.0 м. Станция Z3 располагалась в 2.8 км к СВ от о. Киж на северном выходе

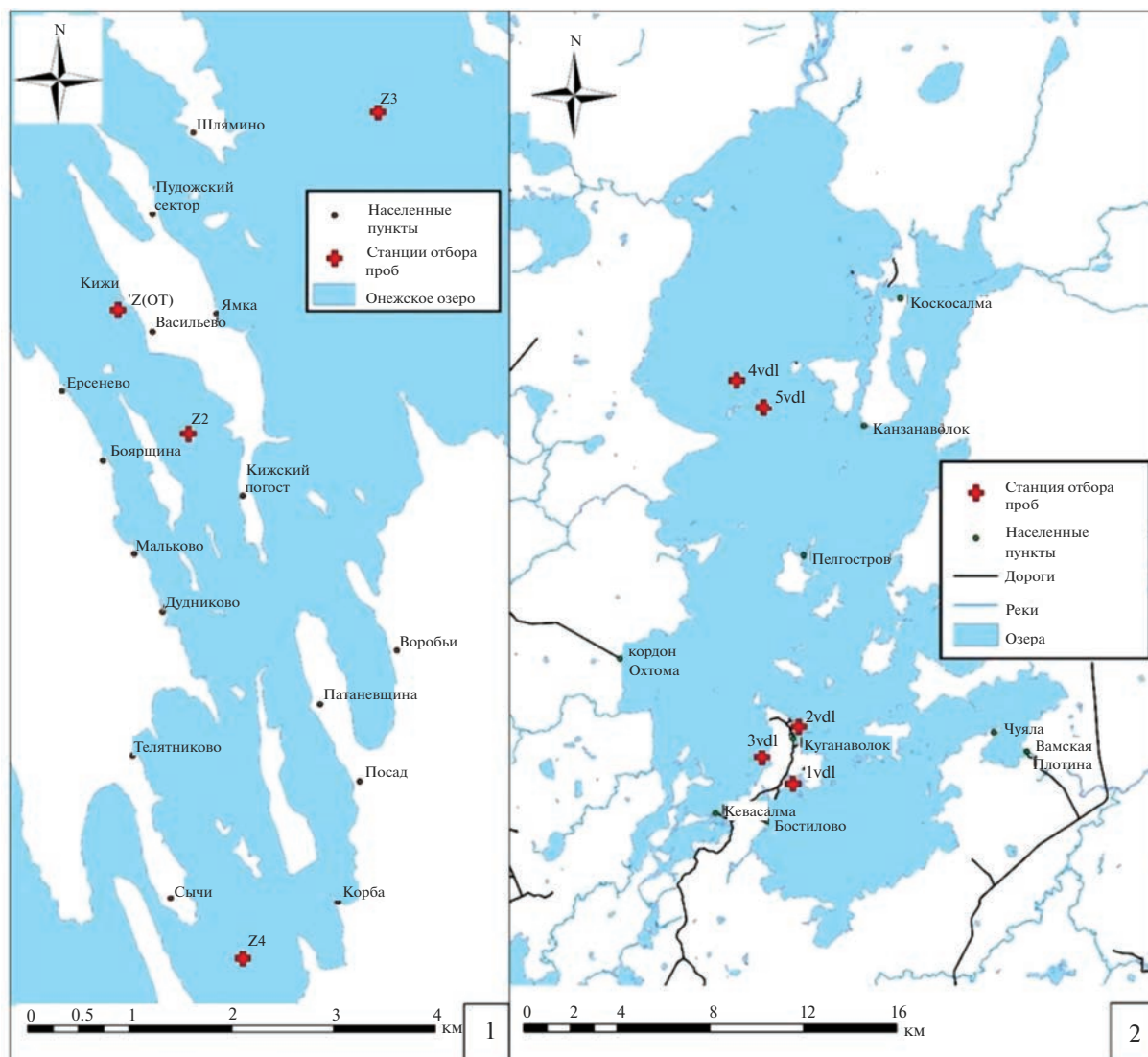


Рис. 1. Станции отбора проб донных осадков на содержание МП в Кижских шхерах оз. Онежского (1) и Водлозеро (2).

судового пути из Кижских шхер, глубина — 9.5 м. Станция Z4 находилась на навигационном пути в 6 км к Ю от о. Кижы в районе с. Сычи, глубина — 6.3 м.

Пробы донных осадков отобраны на пяти участках оз. Водлозеро в июле 2020 г. (рис. 1). Станции были разделены на две категории: зоны возможного прямого антропогенного воздействия (станции 1vdl, 2vdl и 3vdl) и фоновые (5vdl и 4vdl), удаленные от известных точечных источников загрязнения МП. Глубина озера в месте отбора фоновых проб осадков составляла 5.0 м. Станция 1vdl располагалась у входа в губу Реболахта в 300 м от причала администрации Водлозерского национального парка на глубине 3.4 м. Станция 2vdl расположена в районе с. Куганаволок в 350 м от причала села, глубина в месте отбора составила 3.6 м.

Станция 3vdl располагалась западнее п-ова Куганаволок в 300 м от берега на глубине 4.4 м. Станции 1vdl и 3vdl предположительно подвержены влиянию местной свалки, станции 1vdl и 2vdl — воздействию судоходства и сбросов бытовых сточных вод.

Образцы донных осадков отбирали с помощью коробчатого дночерпателя (“Hydrobios”). На оз. Водлозеро для формирования одной пробы на каждой станции отбиралось по 2 дночерпателя. Из каждой пробы 5-сантиметровый поверхностный слой осадка переносили ложкой из нержавеющей стали в стеклянные банки. Образцы хранили в пластиковых контейнерах при температуре 4°C перед анализом в лаборатории. Из каждой пробы отбиралось ~50 г материала для определения физико-химических характеристик осадка. Сухой вес

определялся гравиметрическим методом [18]. Гранулометрический состав определялся на лазерном дифракционном анализаторе частиц “Beckman Coulter LS 13 320”. Содержание органического углерода определялось методом бихроматного титрования [27].

Извлечение частиц МП из донных осадков осуществлялось по методике из [34]. Методика включает в себя следующие этапы: влажное окисление пробы в перекиси водорода; фильтрация пробы через каскад из трех фильтров (333, 174 и 100 мкм) для удаления мелкоалевритовой фракции; плотностное разделение формиатом калия (отделение частиц МП, органического вещества и других легких фракций от более тяжелого осадка); окисление органического вещества перекисью водорода в присутствии катализатора Fe(II); разложение хитиновых и минеральных веществ в растворе HCl; фильтрация через каскад из двух фильтров; сушка. Метод применим для извлечения частиц МП размером от 5 до 0.2 мм с удельной плотностью ≤ 1.5 г/мл, не подверженных разложению в среде перекиси водорода и HCl.

После просушивания пробы МП анализировали с помощью стереомикроскопа “ЛОМО МСП-1” под 40-кратным увеличением. По форме частицы МП классифицировали по пяти группам: фрагменты, пленки, волокна, гранулы и капсулы. Их разделяли на пятнадцать цветов: бесцветный (прозрачный), белый, серый, бежевый, коричневый, зеленый, желтый, розовый, красный, оранжевый, синий, золотистый, фиолетовый, серебристый и черный. Содержание МП в пробе пересчитывалось на сухой вес (СВ) осадка. Внешнее загрязнение от атмосферного воздуха контролировалось в лаборатории путем экспозиции чистых фильтров параллельно с обработкой проб по [34]. Затем фильтры анализировались аналогично основным пробам. Содержание МП в пробах было скорректировано на величину внешнего загрязнения путем вычитания каждой из форм МП в холостой пробе из содержания той же формы МП в основной пробе. Эффективность экстракции МП из осадков оценивалась по [34]. Для уменьшения внешнего загрязнения от атмосферного воздуха экстракцию и анализ МП проводили в ламинарном шкафу “БМБ-II-“Ламинар-С”-1,8 NEOTERIC”. В данной работе количественное содержание МП в пробах приведено по результатам визуального анализа под микроскопом для сопоставимости с другими исследованиями. Доли содержания собственно МП (синтетических полимеров), антропогенных полимеров (модифицированной целлюлозы) и природных частиц в общем пуле визуально идентифицированных частиц по результатам химического анализа приведены отдельно для каждого водного объекта. Химический анализ частиц МП ($n = 50$) проводился с помощью спектрометрического комплек-

са ИК-Фурье производства НПО “Симекс” (микроскоп “МИКРАН-2” и спектрометр “ФТ-801”). Для химического анализа с помощью спектрокопии микро-ИК-Фурье случайным образом выбирались наиболее часто встречаемые в пробах частицы.

Картографический материал подготовлен с использованием ГИС “ArcGis 10.2.2” на основе карт “Open Street Map”. Для статистического анализа результатов использовано свободно распространяемое ПО Sofa Statistics. Для определения статистической разницы содержания МП в Кижских шхерах и в оз. Водлозеро использован непараметрический тест Мана–Уитни (Mann Whitney U Test) при статистической значимости 0.05.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Внешнее загрязнение по МП, по результатам анализа трех холостых проб (2 пробы обработаны параллельно с пробами Кижских шхер и одна проба – параллельно с пробами из оз. Водлозеро), в среднем составило 50 ± 6 ($p = 0.95$) частиц МП на пробу донных осадков. Внешнее загрязнение представлено волокнами и было существенно ниже содержания МП в исследуемых пробах. Внутренний контроль показал, что извлекаемость МП из донных осадков в среднем составляет $96 \pm 5\%$ ($n = 9$, $p = 0.95$).

Содержание микропластика в донных осадках Кижских шхер Онежского озера

В донных осадках Кижских шхер преобладали илстые фракции с медианным размером частиц от 25 до 35 мкм. Влажность осадков составляла $79 \pm 4\%$, содержание органического углерода $4.5 \pm 0.4\%$. Содержание МП в донных осадках Кижских шхер варьировало от 2043 до 6362 и в среднем составило 3413 ± 1965 шт/кг СВ осадка (табл. 1). Наибольшее содержание МП наблюдалось на станции Z2 в районе главного пассажирского причала музея-заповедника “Кижи” и достигало 6362 шт/кг. Общее содержание МП на трех других станциях было однородным и колебалось от 2043 до 2643 шт/кг. Высокая концентрация МП на станции Z2 обусловлена в основном высоким содержанием волокон (85%) (рис. 2).

Примечательно, что волокна – наиболее легко транспортируемая форма МП [8]. Они способны преодолевать большие расстояния в водной среде, и их количество не связано с расстоянием до источников загрязнения МП [33]. Содержание волокон на станции Z2 было как минимум в 1.4 раза больше, чем в центральной части Онежского озера, где этот тип загрязнения преобладает. Возможная причина такого высокого содержания МП заключается в том, что проба была отобрана рядом с судовым ходом. Из-за небольшой глубины,

Таблица 1. Содержание МП в донных осадках Кижских шхер оз. Онежского и Водлозеро

Объект, станция	Координаты		Глубина, м	Общее содержание	Волокна	Фрагменты	Пленки	Капсулы	Гранулы
	с.ш.	в.д.							
шт/кг сухого веса									
Кижские шхеры, оз. Онежское									
Z2	62.0732	35.2138	4.1	6362	5431	285	318	307	22
Z3	62.1010	35.2514	9.5	2574	1548	238	312	372	104
Z4	62.0267	35.2206	6.3	2643	1649	65	677	164	87
Z(ОТ)	62.0839	35.1967	6.0	2043	521	636	511	10	365
оз. Водлозеро									
1vdl	62.2179	36.8834	3.4	369	62	0	123	0	185
2vdl	62.2398	36.8909	3.6	1435	378	227	151	680	0
3vdl	62.2289	36.8590	4.4	1166	947	0	0	146	73
4vdl	62.3747	36.8568	5.0	3571	3175	79	0	0	317
5vdl	62.3637	36.8779	5.0	987	127	32	64	287	478

течения и кильватерных волн, создаваемых судами, происходит взмучивание донных осадков, и они вместе с частицами МП размываются и оседают в прилегающих районах в гораздо больших количествах. Однако из-за медленного водообмена в замкнутой зоне шхер сбросы бытовых вод также могут оказывать сильное влияние на накопление волокон. На других станциях валовое содержание МП и его форм сопоставимо с таковым в других районах Онежского озера [33]. Однако особое беспокойство вызывает большое количество пленок на станциях Z4 и Z(ОТ) и фрагментов МП на станции Z(ОТ) (рис. 2). Повышенное содержание пленок и фрагментов МП может быть связано с близостью источников МП, таких как свалки, поверхностный сток и сброс бытовых сточных вод. Примеры образцов МП, извлеченных из проб донных осадков, представлены на рис. 3.

В донных осадках Кижских шхер наблюдались частицы МП двенадцати цветов (рис. 4). В исследуемых пробах в основном преобладали бесцветные волокна (29%). Кроме того, большую долю составили частицы МП синего и желтого цветов (24 и 15% соответственно). Доля остальных цветов $\leq 6\%$ (рис. 4).

В Кижских шхерах с помощью ИК-спектрометрии исследовано 29 частиц МП, среди которых определено 9 классов различных полимеров (рис. 5). В основном в пробах преобладали волокна модифицированной целлюлозы (МСЕ). Вторыми по количеству среди обнаруженных полимеров были различные нефтяные полимеры (ОФВР), не включенные в основную классификацию (термоклей “Eastobond a-525” и “Eastobond 435”). Встречались также акрил (АС), полипропилен (РР), полиэтилен (РЕ), политетрафторэтил и другие фто-

ропласты (PTFE), полиамид (РА) и полимеры на биологической основе (ВВР). Выявлено несколько частиц антропогенного происхождения по присутствию разных синтетических добавок (ОСА). Природные полимеры (NP) и минеральные остатки (MR) составляли соответственно 10 и 14% исследованных частиц. Таким образом, антропогенное происхождение подтверждено для 76% исследованных частиц, из которых 55% – синтетические полимеры.

Содержание микропластика в донных осадках оз. Водлозеро

Образцы донных осадков оз. Водлозеро на станциях vdl1, vdl2, vdl3 представляли собой грубые и средние илы (медианный размер фракций 16 мкм), в то время как на фоновых станциях (vdl4, vdl5) преобладали фракции очень мелкого песка, очень грубого и грубого ила (медианный размер фракций 60 мкм). Исследованные пробы имели влажность $95.0 \pm 1.9\%$ и содержание органического углерода $8.5 \pm 1.0\%$. В этом отношении они существенно отличаются от осадков Онежского озера, которые имеют значительно меньшее содержание органического углерода ($<5\%$), меньшую влажность и сформированы в основном минеральным материалом [33].

Среднее содержание МП в донных осадках оз. Водлозеро составляло от 369 до 3571, в среднем 1506 ± 845 шт/кг СВ. Максимальное содержание МП в донных осадках на фоновой станции 4vdl составило 3571 шт/кг СВ и обусловлено высоким содержанием волокон. Высокое содержание пленок отмечено на станциях 1vdl (причал Администрации национального парка) и 2vdl (причал с. Куганаволок) (рис. 2). Наибольшее загрязнение фрагментами МП также наблюдалось на станции

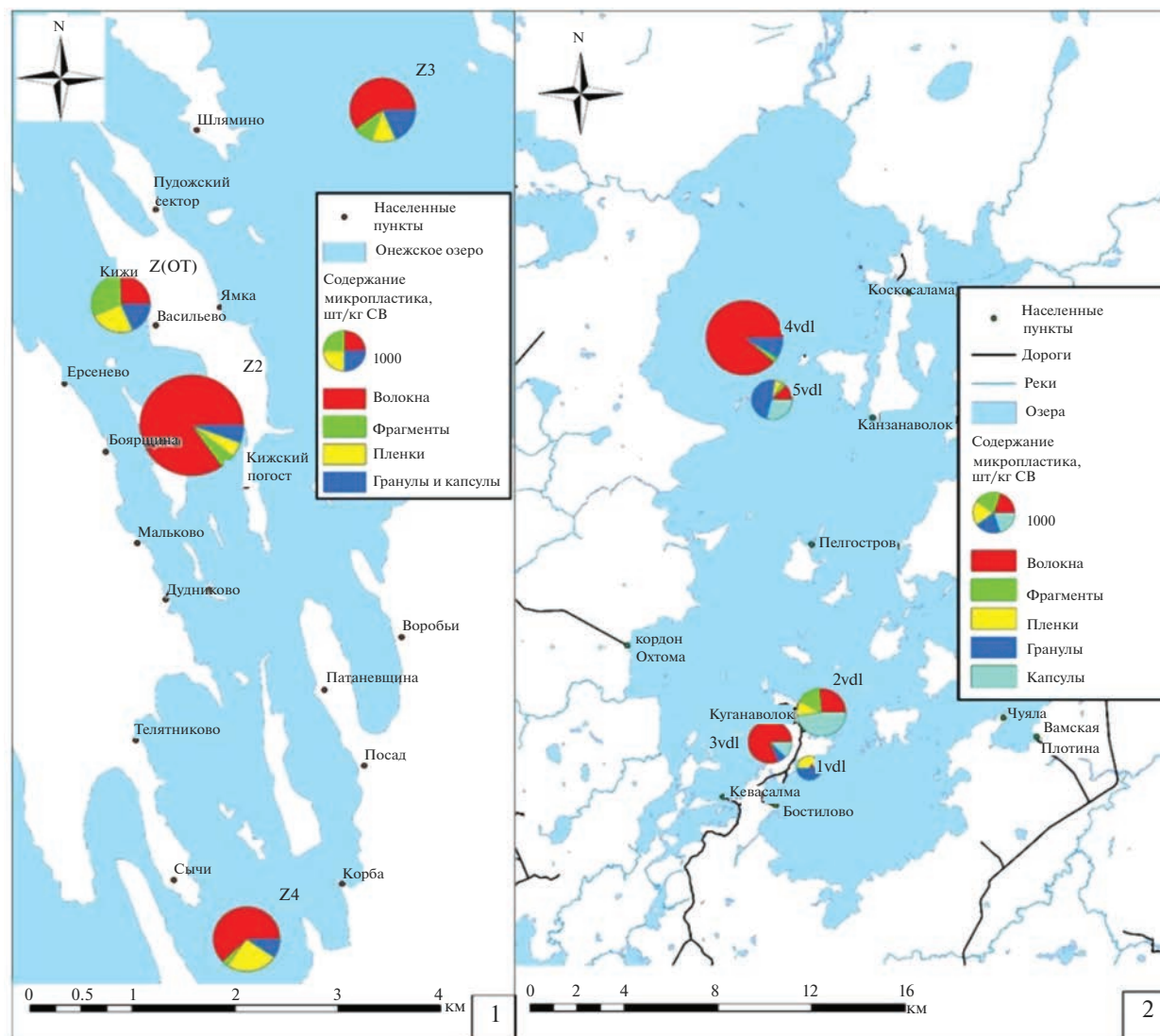


Рис. 2. Содержание МП в Кижских шхерах оз. Онежского (1) и Водлозеро (2).

2vdl. На станциях 1vdl и 2vdl это может быть связано, во-первых, с близостью к источникам загрязнения: свалкам, судоходству и выбросам бытовых сточных вод; во-вторых — с разрушением более крупного пластикового мусора на берегу озера. К сожалению, в настоящий момент отсутствуют методы, позволяющие установить источник происхождения конкретного образца МП. Примеры образцов МП, извлеченных из проб донных осадков, представлены на рис. 6.

Примечательно, что оз. Водлозеро представляет собой неглубокое водохранилище, ранее — водоем ледникового происхождения. Оно имеет среднюю глубину всего 2.8 м при среднем колебании уровня воды 100 см [6]. Из-за небольшой глубины и сильного колебания уровня воды МП

может перераспределяться по акватории озера во время сбросов воды и штормов. Предположительно, это вносит свой вклад в высокий уровень загрязнения донных осадков на фоновых станциях. Однако в этом отношении требуются дополнительные исследования.

В донных осадках оз. Водлозеро выявлены частицы МП четырнадцати цветов (рис. 4). Как и в случае с Кижскими шхерами, в пробах в основном преобладали прозрачные волокна (40.5%). Кроме того, значимую долю составили частицы МП желтого и синего цвета (21.6 и 19.7% соответственно); доли частицы МП других цветов ≤6%.

Химический анализ 21 образца МП выявил 10 классов различных полимеров (рис. 5). Среди них преобладал полиэтилентерефталат (PET),

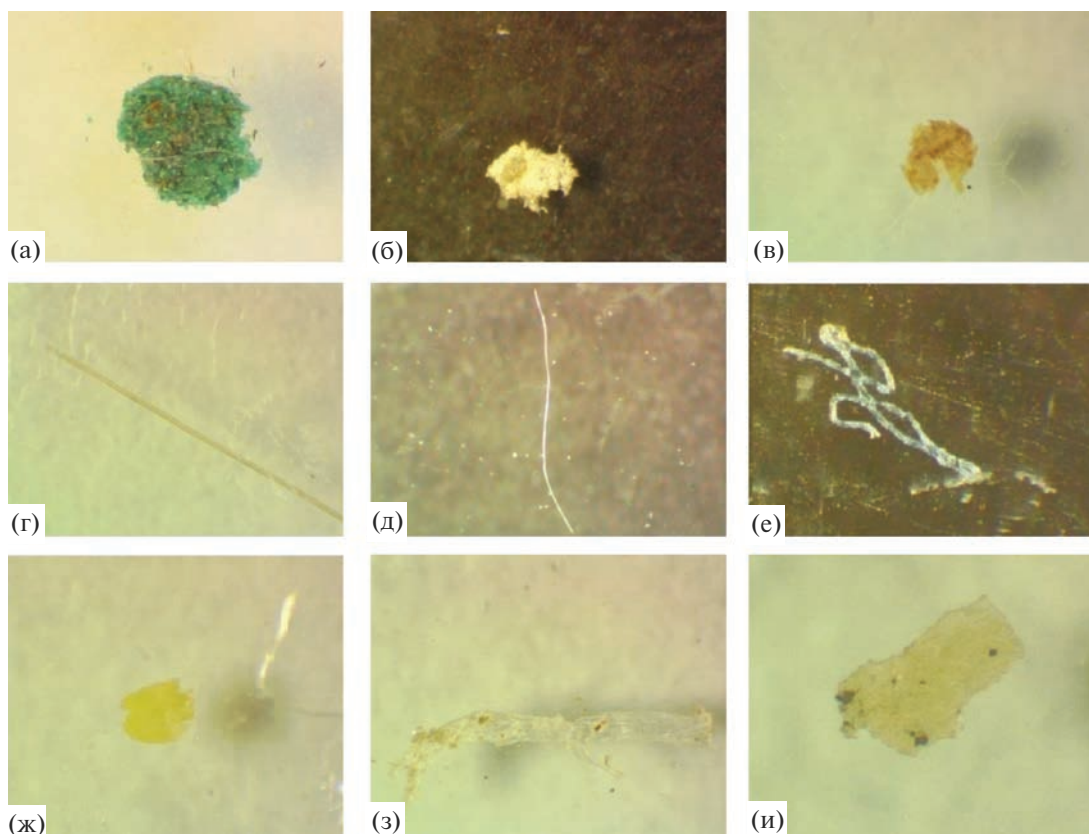


Рис. 3. Образцы МП, извлеченные из донных отложений Кижских шхер (а, б, в – фрагменты; г, д, е – волокна; ж – капсула; з, и – пленки).

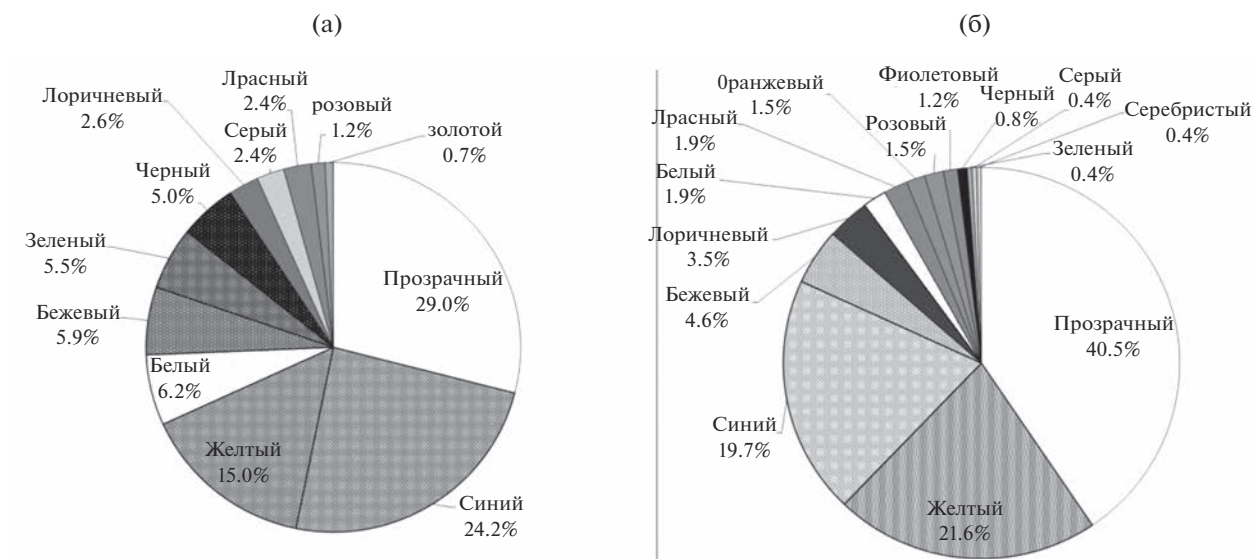


Рис. 4. Распределение частиц МП, выделенных из донных осадков Кижских шхер (а) и оз. Водлозеро (б) по цветам.

далее примерно в равной степени встречались акрил (АС), этил винилацетат (EVA), модифицированная целлюлоза (MCE), полиамид (РА) и

другие полимеры на основе нефти (OFBP) (синтетический каучук и полиолефины). Полимеры природного происхождения (NP) составляли 10%

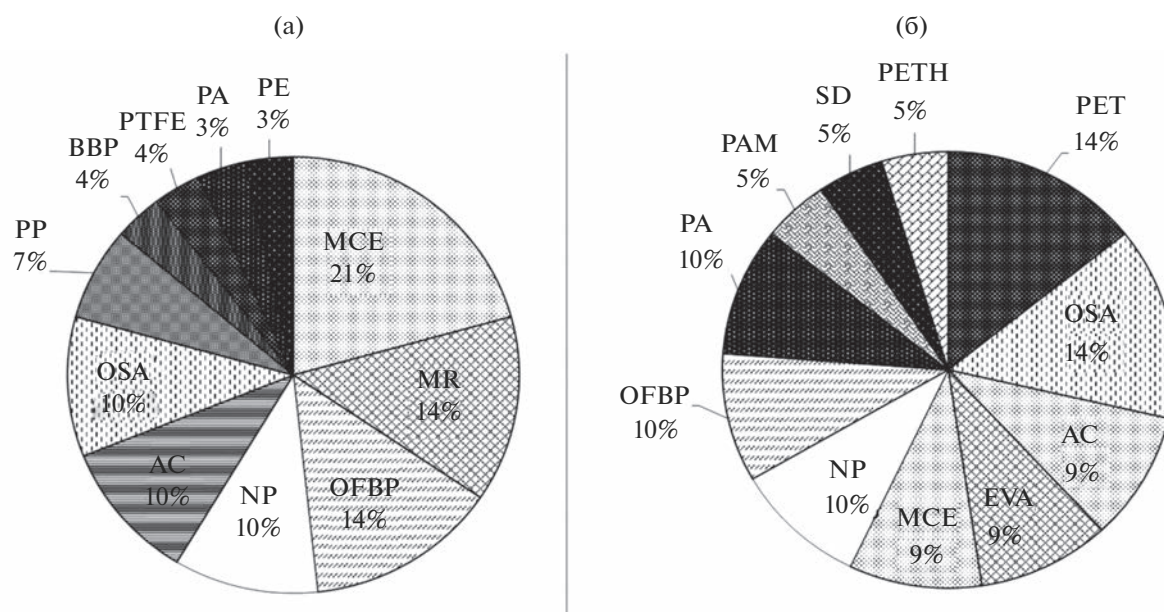


Рис. 5. Типы полимерных частиц МП, выделенные из образцов донных отложений Кижских шхер (а) и оз. Водлозеро (б) (MCE — модифицированная целлюлоза; OFBP — нефтяные полимеры; AC — акрил; PP — полипропилен; PE — полиэтилен; PTFE — политетрафторэтил и другие фторопласты; PA — полиамид; PAM — полиакриламид; SD — синтетические красители; PETH — алкидные (полиэфирные) смолы, краски и клеи; PET — полиэтилентерефталат; EVA — этилвинилацетат; BBP — полимеры на биологической основе; OSA — синтетические добавки; NP — природные полимеры и MR — минеральные остатки).

исследованных образцов, соответственно 90% обнаруженных частиц представлены полимерами антропогенного происхождения, а 81% — синтетическими полимерами.

На всех станциях оз. Водлозеро в большом количестве (до 15 158 шт/кг СВ в пробе) обнаружены желтые капсулы и их остатки (пленки). Размер капсул в среднем составлял ~200 мкм, на поверхности наблюдалась клеточная структура, жесткий (кремниевый) панцирь отсутствовал (рис. 7а, 7б). Возможно, они относятся к динофитовым водорослям, размер которых в исследуемом озере может достигать до 450 мкм [2]. По результатам спектроскопии ИК-Фурье (рис. 7с), состав их близок к экстрактам древесных растений (геркулесовая камедь винсола; глицероэстер кислой смолы, полученной из древесины сосны), совпадение спектров составило до 72%. Поэтому есть вероятность, что это — оболочки семян растений. В связи с этим обнаруженные капсулы были исключены из рассмотрения. Это еще раз показывает важность использования спектроскометрических методов при изучении загрязнения окружающей среды по МП [28].

Значительную часть (до 21%) полимеров, обнаруженных в донных осадках двух исследованных охраняемых территорий, составляют волокна модифицированной целлюлозы (MCE) (рис. 5), в большинстве случаев они были представлены ацетатом целлюлозы и вискозой. Хотя эти волок-

на — регенерированная целлюлоза (природный биоразлагаемый полимер), в процессе обработки в них добавляются различные синтетические добавки (красители, стабилизаторы), которые при разложении могут высвобождаться из них гораздо быстрее, чем при разложении синтетических полимеров [10], что также несет в себе потенциальную опасность для окружающей среды.

Ранее загрязнение донных осадков по МП отмечалось только в оз. Вембанад (Керала, Индия) среди пресноводных озер особо охраняемых территорий, оно составляло в среднем 252.80 ± 25.76 шт/м² [29]. К сожалению, из-за разницы методик экстракции и разных единиц измерения сопоставить их с полученными в настоящем исследовании результатами не представляется возможным. Тем не менее, поскольку исследования на рассмотренных особо охраняемых территориях проводились на одной методической базе, то это позволяет провести сравнение полученных результатов.

Донные осадки Кижских шхер и оз. Водлозеро различаются между собой по гранулометрическому и химическому составу. Первые имеют меньшее содержание органического углерода и меньшую влажность (в среднем 4.5 и 79% соответственно), чем осадки, отобранные в оз. Водлозеро (8.5 ± 1.0 и $95.0 \pm 1.9\%$ соответственно). Такие различия в физико-химических параметрах осадка несколько затрудняют сравнение результатов

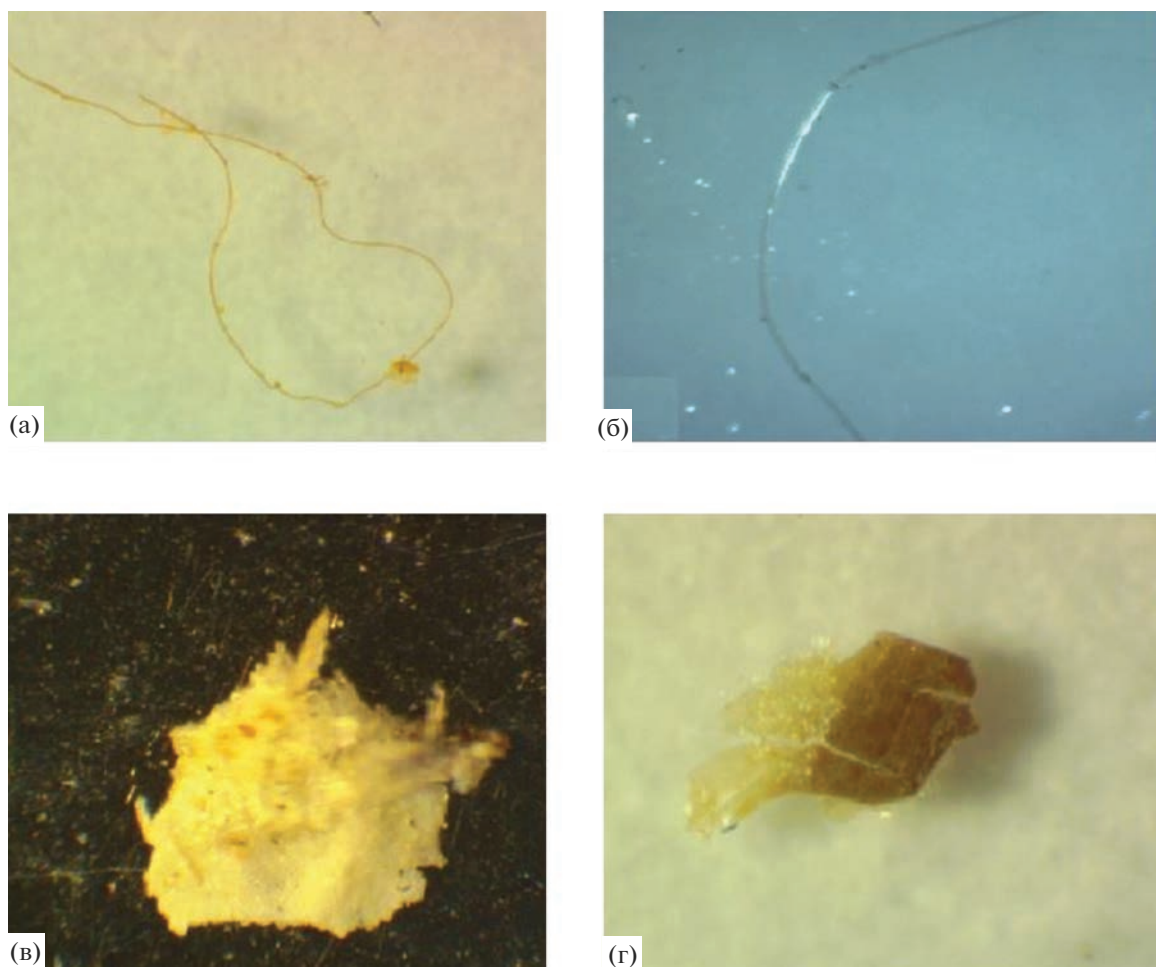


Рис. 6. Образцы МП, извлеченные из донных осадков оз. Водлозеро: а, б – волокна; в, г – фрагменты.

по этим двум территориям. Большие влажность и содержание органического углерода в донных осадках оз. Водлозеро обеспечивают более сильное концентрирование пробы при пересчете на СВ осадка. Тем не менее даже в этих условиях для оз. Водлозеро среднее содержание МП на четырех станциях оказалось существенно ниже, чем в Кижских шхерах: 1506 ± 845 шт/кг против 3413 ± 1965 шт/кг, что объясняется существенно большим содержанием волокон в донных осадках Кижских шхер, хотя это различие и не было статистически значимо как для всех форм (Mann Whitney U Test, $p = 0.08 > 0.05$), так и для волокон отдельно (Mann Whitney U Test, $p = 0.14 > 0.05$).

Наиболее вероятными источниками поступления МП в водные объекты особо охраняемых территорий считаются объекты, расположенные на побережье, но рекреационная активность на водоемах также вносит существенный вклад в их загрязнение в некоторых областях мира [23]. В донных осадках Кижских шхер обнаружено статистически большее количество пленок, чем в

оз. Водлозеро (в среднем 414 в Кижских шхерах против 64 шт/кг в оз. Водлозеро, Mann Whitney U Test, $p = 0.01 < 0.05$), а также фрагментов (261 в Кижских шхерах против 32 шт/кг в оз. Водлозеро, Mann Whitney U Test, $p = 0.04 < 0.05$). Таким образом, можно заключить, что донные осадки Кижских шхер характеризуются существенно большим содержанием МП по сравнению с осадками оз. Водлозеро. Ранее было выявлено, что фрагменты, пленки и гранулы концентрируются возле их источников, а волокна накапливаются в зонах седиментации с глубинами >20 м и в пелагиале Онежского озера [33]. В Кижских шхерах наблюдается существенно большее количество пленок и фрагментов пластика, ассоциирующихся с непосредственными источниками этого загрязнения: свалками бытовых отходов и хозяйственно-бытовыми сточными водами. Хозяйственно-бытовые сточные воды – также один из основных источников полимерных волокон, образующихся при стирке одежды [10], но они также могут поступать и с атмосферными осадками – обнаружались даже в таких отдаленных областях мира,

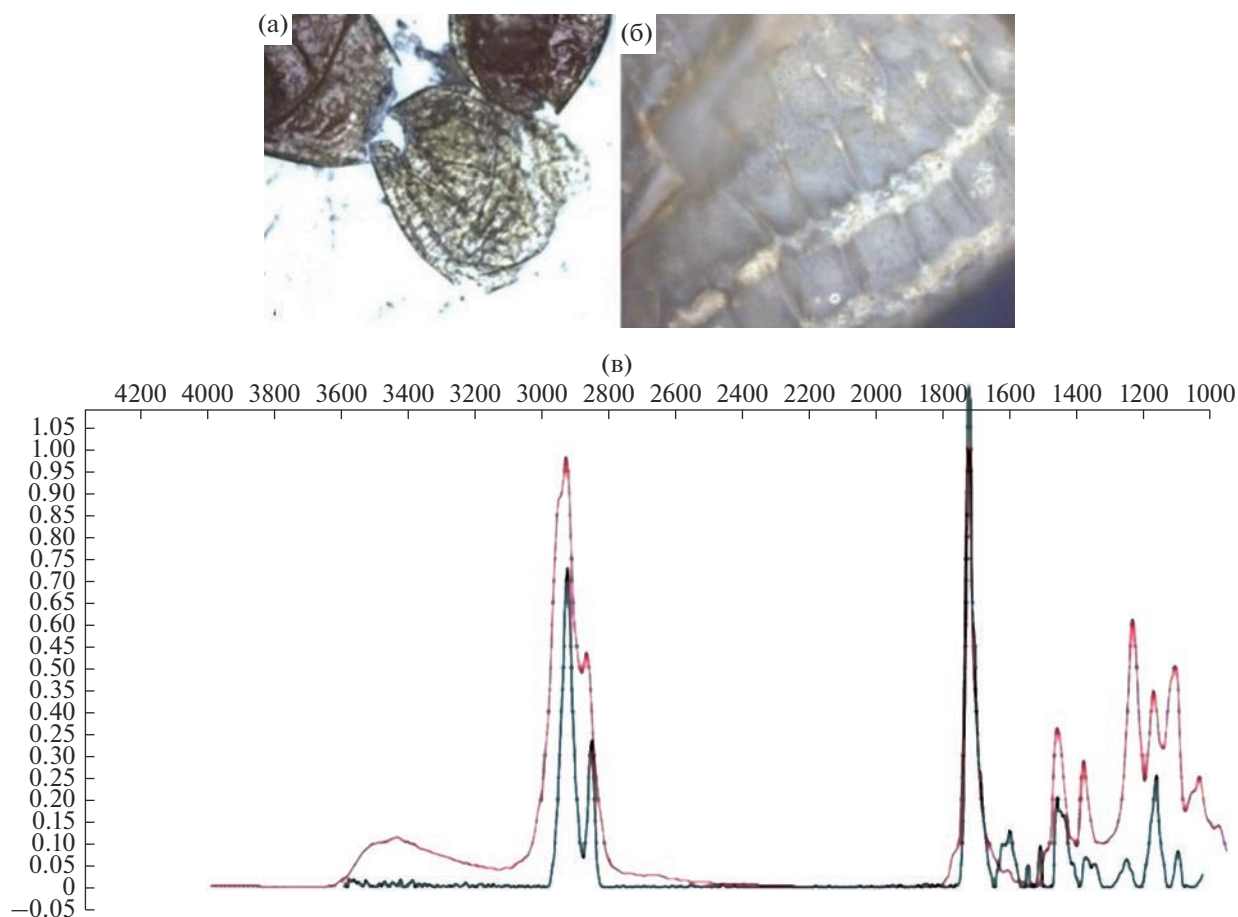


Рис. 7. Желтые капсулы, преобладающие в пробах донных осадков оз. Водлозеро: а — внешний вид; б — структура поверхности; в — ИК-спектр желтых капсул (черный) и референсный спектр полимера, полученного из природной смолы (красный).

как Антарктика [17]. Речной сток — другой распространенный источник МП. Волокна — одна из наиболее распространенных форм МП как в водной среде в целом, так и в водных объектах особо охраняемых природных территорий [23]; эти формы МП довольно легко транспортируются в водной среде [8], могут перераспределяться в водном объекте, и их накопление рядом с источниками не наблюдается [33], что и отмечено авторами как в оз. Водлозеро на ст. 5vdl, так и в Кижских шхерах на ст. Z2. Существенно больший уровень загрязнения по МП Кижских шхер по сравнению с оз. Водлозеро коррелирует и с рекреационной нагрузкой этих территорий: около 160 тыс. туристов посещают ежегодно Кижские шхеры, и около 5 тыс. — оз. Водлозеро [26].

Загрязнение особо охраняемых природных территорий частицами полимеров отмечается как по всему миру [23], так и в Кижских шхерах Онежского озера и оз. Водлозеро. Это показывает, что, несмотря на все усилия по предотвращению антропогенного воздействия на этих терри-

ториях, загрязнение водной среды полимерами наблюдается повсеместно. Специфика этого нового вида загрязнения заключается в возможности его проникновения в наиболее отдаленные и защищенные от воздействия человека уголки природы, что еще раз доказывает необходимость более внимательного изучения данной проблемы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определен уровень загрязнения по МП донных отложений озер особо охраняемых природных территорий Республики Карелии: историко-архитектурного и этнографического музея-заповедника “Киж” (объект всемирного наследия ЮНЕСКО) и Водлозерского национального парка (биосферный заповедник ЮНЕСКО). Выявлено, что МП присутствует во всех исследованных пробах донных осадков. Волокна — наиболее распространенная форма МП на изученных территориях.

В этой связи необходима разработка новых научно-обоснованных подходов к мониторингу МП в водной среде, которые в дальнейшем послужат для разработки программ принятия решения и выбора приоритетных задач по сохранению природных территорий. В этом отношении исследование уровня загрязнения окружающей среды особо охраняемых природных территорий по МП — необходимый этап совершенствования систем управления и устойчивости экосистем к внешним воздействиям.

Поскольку МП невозможно удалить из окружающей среды известными методами, то на основе полученных результатов оценки загрязнения МП донных осадков особо охраняемых природных территории можно выделить основные мероприятия по уменьшению загрязнения водной среды этими частицами, которые могут использоваться не только руководством особо охраняемых территорий, но и другими водопользователями:

1) экологическое просвещение местных жителей и туристов с целью минимизации попадания пластикового мусора в окружающую среду;

2) меры по снижению образования вторичных МП в окружающей среде за счет деградации крупного пластикового мусора — путем рекультивации неорганизованных свалок и проведения регулярной очистки береговой зоны от пластикового мусора;

3) сокращение применения косметики, очищающих средств для лица, зубной пасты и т. д., содержащих первичный МП, а также различных промышленных абразивов на полимерной основе;

4) сокращение объемов сброса хозяйственно-бытовых сточных вод без очистки.

Авторы выражают благодарность сотрудникам группы исследования донных отложений ИВПС КарНЦ РАН за анализ физико-химических параметров осадков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калинкина Н.М., Теканова Е.В., Сярки М.Т. Экосистема Онежского озера: реакция водных сообществ на антропогенные факторы и климатические изменения // Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2017. № 1. С. 4—18.
2. Комулайнен С.Ф., Чекрыжева Т.А., Вислянская И.Г. Альгофлора озер и рек Карелии. Таксономический состав и экология. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. 81 с.
3. Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015.
4. Миронова Н.И. Развитие экологического туризма в России // Сервис в России и за рубежом. 2009. № 4. С. 115—129.
5. Научное обеспечение реализации “Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.”: Сб. науч. тр. Т. 1 / Отв. ред. В.Г. Пряжгинская. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. 486 с.
6. Озера Карелии. Справочник / Под ред. Н.Н. Филатова, В.И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.
7. Отчет о деятельности Государственного историко-архитектурного и этнографического музея-заповедника “Кижь”. 2018 год / Под ред. Е.В. Богдановой. Петрозаводск: Изд. центр музея-заповедника “Кижь”, 2019.
8. Bagaev A., Mizyuk A., Khatmullina L., Isachenko I., Chubarenko I. Anthropogenic fibers in the Baltic Sea water column: Field data, laboratory and numerical testing of their motion // Sci. Total Environ. 2017. V. 599. P. 560—571. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.185>
9. Botterell Z.L., Beaumont N., Dorrington T., Steinke M., Thompson R.C., Lindeque P.K. Bioavailability and effects of microplastics on marine zooplankton: A review // Environ. Pollution. 2019. V. 245. P. 98—110. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.065>
10. Cesa F.S., Turra A., Baruaque-Ramos J. Synthetic fibers as microplastics in the marine environment: a review from textile perspective with a focus on domestic washings // Sci. Total Environ. 2017. V. 598. P. 1116—1129.
11. 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. № 1—2. P. 105—112.
12. Darabi M., Majeed H., Diehl A., Norton J., Zhang Y. A review of microplastics in aquatic sediments: occurrence, fate, transport, and ecological impact // Current Pollution Reps. 2021. V. 7. № 1. P. 40—53. <https://doi.org/10.1007/s40726-020-00171-3>
13. Dharmadasa W.S., Andrady A.L., Kumara P.T.P., Maes T., Gangabadage C.S. Microplastic pollution in marine protected areas of Southern Sri Lanka // Mar. Pollut. Bull. 2021. V. 168. P. 112462.
14. Fred-Ahmadu O.H., Bhagwat G., Oluyoye I., Benson N.U., Ayejuyo O.O., Palanisami T. Interaction of chemical contaminants with microplastics: principles and perspectives // Sci. Total Environ. 2020. № 706. P. 135978. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135978>
15. Galakhina N.E., Zobkov M.B., Zobkova M.V. Current chemistry of Lake Onego and its spatial and temporal changes for the last three decades with special reference to nutrient concentrations // Environ. Nanotechnol., Monitoring Management. 2022. V. 17. P. 100619. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100619>
16. Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: part 2 a global assessment / Eds P.J. Kershaw, C.M. Rochman. GESAMP. Rep. Stud. 2016. № 93. 220 p.
17. Gonz'alez-Pleiter M., Edo C., Vel'azquez D., Casero-Chamorro M.C., Legan'es F., Quesada A., Fern'andez-Pi'nas F., Rosal R. First detection of microplastics in the freshwater of an Antarctic Specially Protected Area // Mar. Pollut. Bull. 2020. V. 161. P. 111811.
18. Hakanson L., Jansson M. Principles of Lake Sedimentology. Berlin: Springer-Verlag, 1983. 316 p. <http://we->

- bapps.unitn.it/Biblioteca/it/Web/EngibankFile/Principles%20of%20lakes%20sedimentology.pdf
19. He M., Yan M., Chen X., Wang X., Gong H., Wang W., Wang J. Bioavailability and toxicity of microplastics to zooplankton // *Gondwana Res.* 2021. V. 108. P. 120–126.
<https://doi.org/10.1016/j.gr.2021.07.021>
 20. Jensen L.H., Motti C.A., Garm A.L., Tonin H., Kroon F.J. Sources, distribution and fate of microfibers on the Great Barrier Reef, Australia // *Sci. Rep.* 2019. V. 9. № 1. P. 1–15.
 21. Jones J.S., Porter A., Muñoz-Pérez J.P., Alarcón-Ruales D., Galloway T.S., Godley B.J., Santillo D., Vagg J., Lewis C. Plastic contamination of a Galapagos Island (Ecuador) and the relative risks to native marine species // *Sci. Total Environ.* V. 789. 2021. P. 147704.
 22. Jung Y.S., Sampath V., Prunicki M., Aguilera J., Allen H., LaBeaud D., Veidis E., Barry M., Erny B., Patel L., Akids C., Akids M., Nadeau K. Characterization and regulation of microplastic pollution for protecting planetary and human health // *Environ. Pollution.* 2022. P. 120442.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120442>
 23. Kutralam-Muniasamy G., Pérez-Guevara F., Elizalde-Martínez I., Shruti V.C. How well-protected are protected areas from anthropogenic microplastic contamination? Review of analytical methods, current trends, and prospects // *Trends in Environ. Analytical Chem.* 2021. V. 32. P. e00147.
 24. 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>
 25. Priya K.L., Renjith K.R., Joseph C.J., Indu M.S., Srinivas R., Haddout S. Fate, transport and degradation pathway of microplastics in aquatic environment – A critical review // *Regional Studies Marine Sci.* 2022. P. 102647.
<https://doi.org/10.1016/j.rsma.2022.102647>
 26. Rossi P., Shveykovskiy A., Fedorova E., Piippo S., Akhmetova G., Novikov S., Zdrovennov R., Timofeeva V., Zobkov M., Silvennoinen D.L., Hokkanen T.J., Smirnova A. DPSIR Framework (Drivers, Pressures, States, Impacts and Responses) Case-Study of Four UNESCO National Parks and Reserves in Russia and Finland. 2021. 196 p.
https://r1.nubex.ru/s586-cf6/f2102_eb/DPSIR_en_2.pdf
 27. Soil Sampling and Methods of Analysis (Second Edition) / Eds M.R. Carter, E.G. Gregorich. Boca Raton: CRC Press, 2007. 1264 p.
<https://doi.org/10.1201/9781420005271>
 28. Song Y.K., Hong S.H., Jang M., Han G.M., Rani M., Lee J., Shim W.J. A comparison of microscopic and spectroscopic identification methods for analysis of microplastics in environmental samples // *Mar. Pollution Bull.* 2015. V. 93. № 1–2. P. 202–209.
 29. Sruthy S., Ramasamy E.V. Microplastic pollution in Vembanad Lake, Kerala, India: the first report of microplastics in lake and estuarine sediments in India // *Environ. Pollution.* 2017. V. 222. P. 315–322.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.038>
 30. Wu N., Zhang Y., Li W., Wang J., Zhang X., He J., Ma Y., Niu Z. Co-effects of biofouling and inorganic matters increased the density of environmental microplastics in the sediments of Bohai Bay coast // *Sci. Total Environ.* 2020. V. 717. P. 134431.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134431>
 31. Xiang Y., Jiang L., Zhou Y., Luo Z., Zhi D., Yang J., Lam S.S. Microplastics and environmental pollutants: key interaction and toxicology in aquatic and soil environments // *J. Hazardous Materials.* 2022. V. 422. P. 126843.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126843>
 32. Zalasiewicz J., Waters C.N., Ivar do Sul J.A., Corcoran P.L., Barnosky A.D., Cearreta A., Edgeworth M., Gałuszka A., Jeandel C., Leinfelder R., McNeill J.R., Steffen W., Summerhayes C., Waprich M., Williams M., Wolfe A.P., Yonnan Y. The geological cycle of plastics and their use as a stratigraphic indicator of the Anthropocene // *Anthropocene.* 2016. V. 13. P. 4–17.
<https://doi.org/10.1016/j.ancene.2016.01.002>
 33. Zobkov M.B., Belkina N.A., Kovalevski V.V., Zobkova M.V., Efremova T.A., Galakhina N.E. 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. Chemical Engineering.* 2020. V. 8. № 5. P. 104367.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104367>
 34. Zobkov M.B., Zobkova M.V., Galakhina N.E., Efremova T.A. Method for microplastics extraction from Lake sediments // *MethodX.* 2020. V. 7. P. 101140.