

ПЛАСТИКОВОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИБРЕЖНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД СРЕДНЕГО И ЮЖНОГО БАЙКАЛА¹

© 2021 г. О. В. Ильина^а, *, М. Ю. Колобов^а, В. В. Ильинский^а

^аМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Москва, 119234 Россия

*e-mail: ulesya@gmail.com

Поступила в редакцию 21.11.2019 г.

После доработки 19.06.2020 г.

Принята к публикации 19.06.2020 г.

Впервые проведена оценка содержания пластиковых частиц в поверхностных водах оз. Байкал. Проведен анализ на содержание частиц пластика в траловых пробах, отобранных в прибрежной зоне наиболее населенного юго-восточного побережья и в Малом Море — одном из самых популярных туристических мест на Байкале. В пересчете на площадь водной поверхности концентрация частиц составила от 19 000 до 75 000 пластиковых частиц на 1 км² при среднем значении 42 000 частиц на 1 км², что соответствует высокой степени пластикового загрязнения. По химическому составу частицы идентифицированы как полиэтилен, полипропилен и полистирол. Предполагается, что микропластик, обнаруженный в ходе исследования, — продукт распада различных бытовых упаковочных материалов.

Ключевые слова: пресноводные экосистемы, пластиковое загрязнение, количественный анализ, микропластик, озеро Байкал.

DOI: 10.31857/S0321059621010181

Проблема загрязнения водных экосистем синтетическими полимерами впервые была обозначена в 1960-е гг. практически одновременно с началом их массового производства. За прошедшее время в океане сформировались разновеликие “мусорные пятна” — обширные скопления пластиковых отходов в циклических зонах океанских течений [13, 23, 25, 26].

В настоящее время существует несколько стабильных крупных “мусорных пятен” в океанских циклических зонах: в северной и южной частях Тихого и Атлантического океанов и в Индийском океане [13]. Фрагменты пластика обнаружены в самых удаленных зонах Мирового океана [9], в том числе в глубоководных донных пробах [17, 19].

Пластиковые поллютанты в зависимости от размеров делят на три основные категории: микропластик, мезопластик и макропластик. В большинстве работ эти категории соотносят с максимальным линейным размером <5 мм, от 5 до 20 мм и >20 мм соответственно [8, 24]. Отдельно неко-

торые исследователи выделяют категорию нанопластика (обычно в этом качестве принимаются частицы, имеющие максимальный линейный размер <100 нм) [21]. Данная классификация размерных категорий — наиболее распространенная и используется в большинстве работ, включая данную, но ее нельзя назвать общепризнанной: некоторые авторы предлагают использовать иные границы, например относят к микропластику частицы размером <1 мм [7].

Проблема загрязнения пластиком водоемов на территории России изучена недостаточно. Существует ряд исследований, направленных на изучение полимерного загрязнения внешних территориальных вод. В частности, такие работы проводились на Балтийском море [32] и в зал. Петра Великого Японского моря [1]. Что касается внутренних водоемов России, количественные оценки содержания пластика в их водах практически отсутствуют. Большой интерес для исследований представляет оз. Байкал — олиготрофный водоем, характеризующийся высоким биоразнообразием и обилием эндемичных видов, а также уникальной системой самоочищения, что делает его ценнейшим резервуаром питьевой воды [3]. В настоящее время вследствие интенсивного антропогенного воздействия в экосистеме озера происходят

¹ Работа выполнена в рамках Программы развития “Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова” до 2020 года, приоритетное направление — “Рациональное природопользование и устойчивое развитие регионов России” и при поддержке Фонда “Глобал Грин-грантс / Global Greengrants Fund” (грант No 60-184).



Рис. 1. Картограмма мест отбора проб на содержание частиц пластика в поверхностном слое воды оз. Байкал в августе 2017 г. Места отбора проб: TR1 – 1, TR2 – 2, TR3 – 3, TR7 – 4.

заметные изменения, связанные как с локальным эвтрофированием прибрежной зоны, так и с рядом других негативных процессов [4, 30].

Особый природоохранный статус оз. Байкал, регламентируемый Федеральным законом № 94-ФЗ от 01.05.1999 [6], накладывает ограничения на строительство и функционирование полигонов, пунктов переработки и утилизации твердых бытовых отходов (ТБО) вблизи его береговой линии. Это привело к отрицательным последствиям – многолетнему функционированию необорудованных полигонов ТБО либо их полному отсутствию, особенно в малых населенных пунктах. Этот факт многократно увеличивает риски попадания пластиковых отходов в озеро. Стихийный туризм также способствует накоплению пластиковых отходов в прибрежной зоне с большой вероятностью их дальнейшего попадания в воду. Учитывая значительную общую численность населения, проживающего в водосборном бассейне озера (почти 1300000 человек [4]), такую вероятность можно оценить как высокую. Можно утверждать, что прибрежная зона оз. Байкал служит местом аккумуляции пластиковых отходов.

Целью настоящей работы было изучение распределения, размерного и химического состава пластиковых частиц в поверхностном слое воды прибрежной зоны оз. Байкал в нескольких географических точках рядом с наиболее населенными или популярными туристическими местами на Байкале.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Сбор материала для исследования проводился в июле 2017 г. на трех участках юго-восточного побережья оз. Байкал (рис. 1) от пос. Танхой до пос. Новый Энхалук (пробы TR01, TR02, TR03) и на участке, расположенном в средней части оз. Байкал, в прол. Малое море вблизи о. Ольхон (TR07), посредством одновременной буксировки в поверхностном слое воды (0–100 см) трех одинаковых конусообразных сетей за судном. Суммарная длина путей траления составила 17.78 км, площадь – 0.01068 км². Все трансекты располагались на удалении до 2 км от береговой линии. Объем воды, профильтрованной сетями, оценивается в 1676 м³ (табл. 1).

Сети изготовлены с использованием сетки из нержавеющей стали с размером ячеек 300 мкм. Каждая сеть общей длиной 60 см имела форму конуса с устьем диаметром 20 см и стакан-коллектор для сбора сконцентрированных проб. Буксировка сетей за судном проводилась со скоростью 2–3 узла. Координаты начальной и конечной точек буксировки фиксировались с помощью GPS-трекера.

При подготовке и анализе проб воды использовалась модифицированная стандартная методика, рекомендованная Национальным управлением океанических и атмосферных исследований США (NOAA) [24]. Пробоподготовка заключалась в мокрой минерализации собранных проб и включала в себя неспецифическое окисление исходной смеси в 30%-м растворе перекиси водорода и дальнейшую плотностную сепарацию в насыщенном растворе хлорида натрия. Для последующего анализа продукты сепарации переносили на полиамидные фильтры.

Анализ проб проводился в пылезащищенном боксе, в процессе работы использовалась защитная хлопчатобумажная одежда, максимально исключалось использование оборудования и расходных материалов, содержащих пластик. Анализируемые полиамидные фильтры хранились в стеклянных чашках Петри. Контроль загрязнения артефактным микропластиком в процессе аналитической работы осуществлялся методом параллельного анализа “пустых” фильтров.

Идентификация и подсчет частиц микропластика проводились под бинокулярным микроскопом с рабочим увеличением $\times 10$ – $\times 50$. Помимо визуальных признаков, частицы тестировались на пластичное плавление “тестом горячей иглы”. Весь размерный диапазон был условно разделен на размерные группы с интервалом 0.2 мм. Группы обозначались по минимальному размеру, далее в тексте под размером частиц имеется в виду размерный диапазон. Каждая идентифицированная частица заносилась в базу данных, фотографировалась, фиксировались ее форма,

Таблица 1. Координаты мест отбора и характеристики траловых проб на содержание частиц пластика в поверхностном слое воды оз. Байкал в августе 2017 г.

Проба	Координаты отбора пробы		Характеристики пробы		
	начало траления	окончание траления	длина пути траления, км	объем профильтрованной воды, м ³	площадь траления, км ²
TR01	51°34'44.26" с.ш. 105°12'8.28" в.д.	51°35'23" с.ш. 105°15'15.81" в.д.	3.80	358	0.00228
TR02	51°43'13.48" с.ш. 105°50'45.82" в.д.	51°44'05.24" с.ш. 105°55'06.25" в.д.	5.24	494	0.003144
TR03	52°28'15.79" с.ш. 106°52'58.33" в.д.	52°29'47.11" с.ш. 106°56'48.67" в.д.	5.01	472	0.003006
TR07	53°11'27.00" с.ш. 107°17'10.00" в.д.	53°10'57.00" с.ш. 107°13'55.00" в.д.	3.73	352	0.002238
Суммарно	—	—	17.78	1676	0.010668

размеры и цвет. В зависимости от соотношения линейных размеров частицы ее относили к фрагментам, пленкам или волокнам [18].

Концентрация частиц пластика определялась как количество и масса обнаруженных частиц на единицу площади водной поверхности и объем профильтрованной сетью воды. Площадь водной поверхности вычислялась как произведение длины пути траления и ширины сети, объем — как произведение длины пути траления и площади устья сети. Для каждой станции вычислялось соотношение суммарного количества или массы обнаруженных частиц и суммарной площади тралений или объема профильтрованной воды. Среднее вычисляли как отношение суммарного количества или массы всех обнаруженных частиц к суммарной площади или объему профильтрованной воды.

Масса частиц пластика оценивалась как произведение графически вычисленного объема частицы и средней плотности условного полимера. Последнюю принимали равной 0.90 г/см³ в соответствии со средней плотностью преобладающих в поверхностном слое типов полимеров (полиэтилен — 0.91–0.94, полипропилен — 0.83–0.85 г/см³). Индивидуальный объем частиц рассчитывался методом анализа микрофотографий в графической программе Kompas, v14.0. Ошибка данного метода, вычисленная на контрольных частицах, — в интервале 5–39% (в среднем 24%) в зависимости от формы и материала частиц. На взгляд авторов статьи, подобная погрешность приемлема с учетом того, что прямое взвешивание микрочастиц также дает значительные аналитические ошибки вследствие невозможности отделения частиц микропластика от органической поверхностной пленки, что приводит к су-

щественному завышению полученных значений [26]. Кроме того, в ходе манипуляций при прямом взвешивании неизбежны потери численно преобладающих в выборках частиц размером <1–2 мм, особенно микроволокон, что приводит к занижению оценок их массовой доли относительно других размерных фракций.

Чувствительность метода оценивалась с помощью внесения в пробы контрольных частиц, имеющих в составе флуоресцентные красители [32]. Чувствительность определялась как отношение количества определенных фрагментов к общему количеству фрагментов, помещенных в пробу изначально.

Состав частиц определялся методом ИК-спектromетрии. В качестве образцов отобрано десять частиц пластика, имеющих размер $\geq 2 \times 2$ мм. Инфракрасные спектры регистрировались на спектрометре “Perkin Elmer Spectrum One”, оснащенном приставкой “Universal ATR Accessory” для измерений в режиме нарушенного полного внутреннего отражения. Химический состав проанализированных образцов устанавливали методом сравнения полученных спектральных сигналов с эталонными по данным [5, 29].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведен анализ четырех траловых проб. В пробах обнаружено 446 частиц пластика. Определены размеры и оценена масса 440 частиц — суммарно она составила 71.07 мг (табл. 2). По размерным характеристикам 91.6% частиц отнесены к микропластику, 7.5% — к мезопластику, 0.9% — к макропластику. Диапазон размеров большинства частиц — 0.2–32.8 мм, масса — 0.00004–20.8 мг. Шесть частиц, не вошедших в список анализируемых, классифицированы как волокна

Таблица 2. Показатели загрязнения траловых проб пластиковыми частицами и пересчет в концентрации и суммарные массы на единицу площади поверхностных вод

Проба	Количество частиц в пробе, шт.	Типовые формы частиц, экз/км ²			Суммарная масса частиц, мг	Количество, экз/км ²	Общая масса, г/км ²
		фрагменты	пленки	волокна			
TR01	34	2632	3070	9211	0.89	14912	0.39
TR02	237	20038	49936	5407	21.06	75382	0.48
TR03	58	4657	4990	9647	2.63	19295	0.87
TR07	117	9830	38874	3575	46.49	52279	20.77
Суммарно	446	37157	96870	27840	71.07	41807	6.66

с размерами <3 мм. Их исключение существенно не повлияло на результаты анализа.

Частицы пластика обнаружены во всех траловых пробах, однако уловистость одновременно используемых сетей была разной. Так, стандартная ошибка для пробы TR01 составила 7.6% от среднего значения, для TR02 – 1.7, для TR03 – 9.9, для TR07 – 5.5%. На единицу площади среднее количество частиц пластика на четырех станциях менялось от 14912 до 75 382 частиц/км² при средней величине 41807 частиц/км² (табл. 2). Суммарное массовое содержание частиц менялось от 0.39 до 20.77 г/км² при среднем значении 6.66 г/км². Средние концентрации и массы для всех четырех станций составили 0.27 частиц/м³ и 42.41 мкг/м³ соответственно.

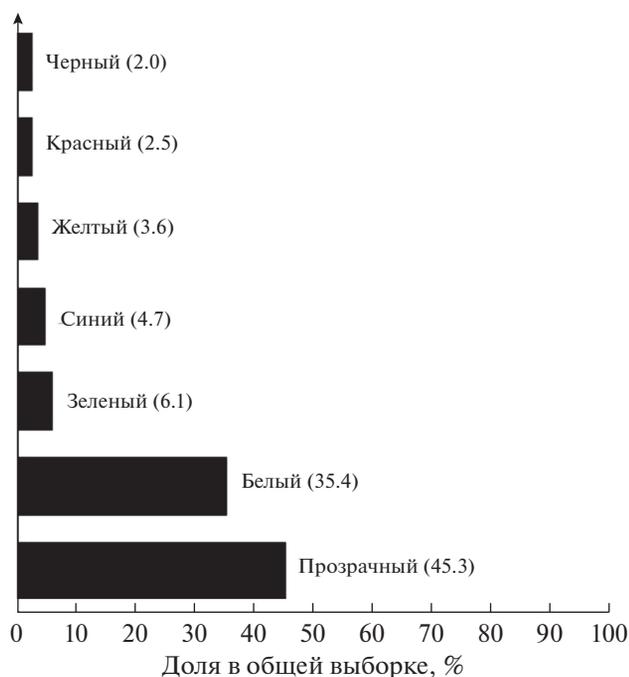


Рис. 2. Распределение частиц пластика в общей выборке по цветности.

В полученной выборке преобладали прозрачные и белые частицы (рис. 2). Их относительное количество составило 45.3 и 35.4% соответственно. Это соответствует соотношению, известному из [18]. Третью по встречаемости цветовую группу составляли зеленые частицы (6.1%). Преимущественно они были представлены толстыми полипропиленовыми волокнами. Вероятно, их источником были брошенные рыболовные сети, которые составляют значительную долю пластикового загрязнения берега.

Весь обнаруженный микро-, мезо- и макропластик классифицирован как вторичный, возникший при разрушении более крупных фракций, за исключением одного фрагмента, который, предположительно, относился к микросферам. Практически все частицы вторичного пластика имели следы разрушения: царапины, трещины, неровные края. Некоторые частицы были хрупкими и в процессе анализа разрушались на более мелкие фрагменты.

Количество частиц, которые можно охарактеризовать как вспененный материал, ≤10 (2% общего числа). Из-за их плотной текстуры и малых размеров (<1 мм) не всегда возможно достоверно подтвердить их принадлежность к определенной фракции. Все они отнесены к категории фрагментов.

По форме в общей выборке частиц преобладали пленки (59.6%). Они также преобладали в пробах TR02 (66.2%) и TR07 (74.4%) (рис. 3), в которых обнаружено наибольшее содержание частиц пластика (табл. 2). В пробах TR01 и TR03 с относительно малым количеством частиц пластика преобладали волокна. Их доля составила 62 и 50% соответственно (рис. 3, табл. 2).

По размерным категориям частицы пластика распределены неравномерно. Большинство частиц имело размеры от 0.2 до 3.2 мм (83.4%) с явным преобладанием размеров 0.4–1.6 мм (55.7%) (рис. 4). В процессе исследований в пробах обнаружены частицы размером вплоть до 32.8 мм. Доля таких частиц (5–32.8 мм), относимых к мезо- и макропластику, составила 8.4% в общей выборке.

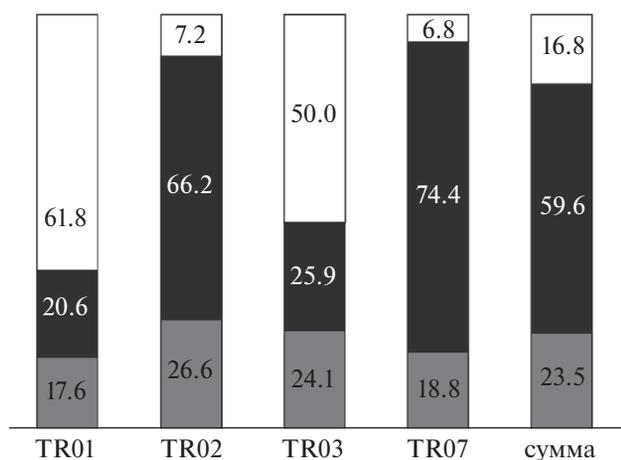


Рис. 3. Содержание, %, основных форм частиц пластика в отдельных траловых пробах и в общей выборке. Цветовые обозначения: черный – пленки, серый – фрагменты, белый – волокна.

На рис. 4 верхняя граница диапазона размеров частиц – 9.0 мм, поскольку частицы большего размера встречены в пробах в единичных экземплярах и их присутствие не влияет на общую картину, однако это необходимо отметить. Во всех пробах обнаружено 10 таких частиц с размерами 11, 13, 15, 17, 20, 27, 28 и 33 мм. С другой стороны, малое количество в пробах частиц размером <0.3 мм, скорее всего, связано с размером ячеек сетного конуса используемых сетей – 0.3 мм, а также с методом их учета. Трудность обнаруже-

ния таких частиц увеличивается обратно пропорционально их линейному размеру.

Распределение частиц по массе вполне закономерно сдвинуто в сторону фракций большего размера, их доля в общей массе обнаруженного пластика преобладает. На рис. 5 отображены массовые доли наиболее часто встречаемых размеров частиц в диапазоне до 9.0 мм. Необходимо отметить, что крупные и единично встреченные частицы >9 мм, о которых шла речь ранее, в данном случае вносят 50% массы в общую выборку. Более того, это значение может быть недооценено с большой вероятностью вследствие малого количества обнаруженных крупных частиц.

Массовая доля микропластика в общей выборке составляет 42.4, мезопластика – 12.4, макропластика – 45.2%. В пробе TR07 преобладали более крупные частицы. Массовая доля микропластика в ней составляла только 20.6%, а 66.5% (30.94 мг) общей массы пластика составляла масса двух частиц крупной пленки, относящихся к мезо- и макропластику (1.7% общего числа частиц в пробе). Этот факт может быть следствием как близости источников загрязнения, так и меньшей интенсивности разрушения пластика в акватории Малого моря из-за относительно низкой волновой активности по сравнению с открытой частью Байкала.

В выборке из десяти частиц, для которых проводилось определение химического состава, полиэтилен составлял 50, полипропилен – 40, полистирол – 10%.

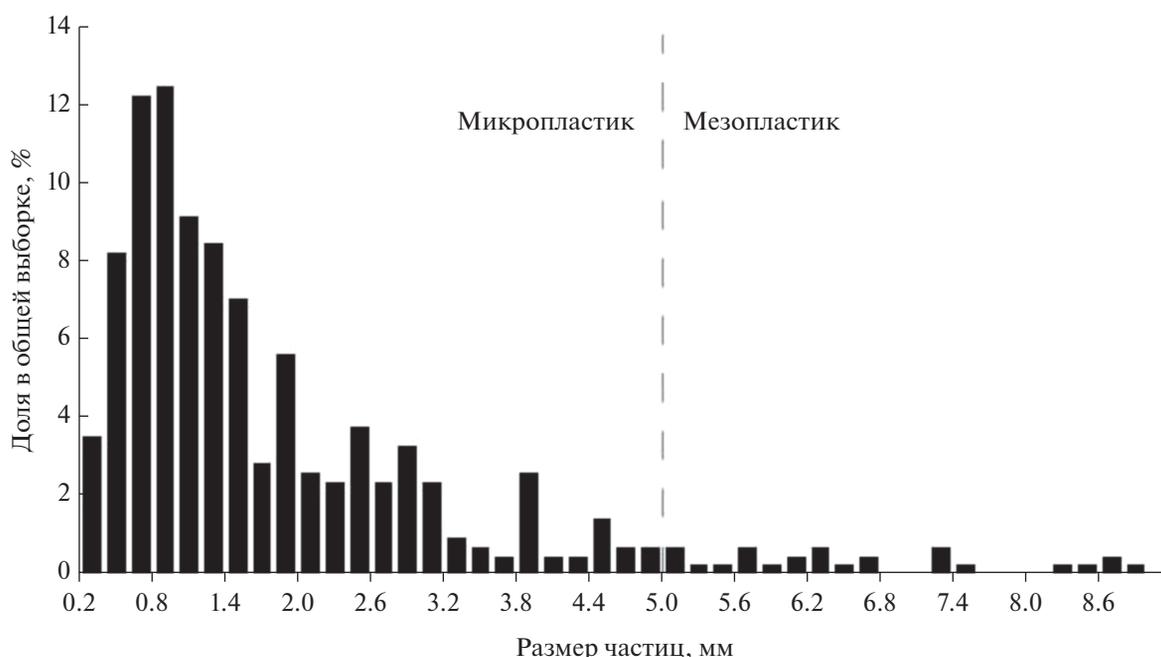


Рис. 4. Процентное распределение частиц пластика в размерном диапазоне общей выборки проб.

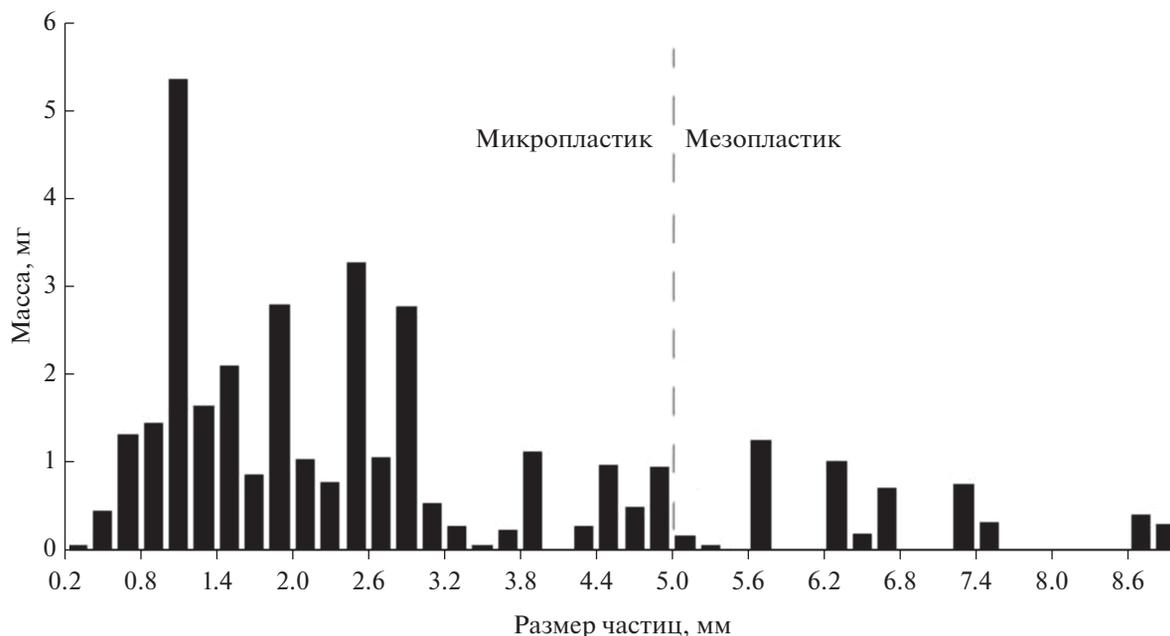


Рис. 5. Суммарные массы частиц пластика разных размеров в диапазоне общей выборки проб.

Чувствительность метода обнаружения, использованного в процессе анализа, оценена как достаточно высокая — $96 \pm 4\%$. Загрязнение составило не более одной частицы на пробу, что соответствует 0.9% количества всех обнаруженных частиц. Все артефактные частицы по форме относились к волокнам.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обследованные в работе районы Байкала различаются по расположению относительно возможных источников загрязнения пластиком. Участок рядом с пос. Танхой, вероятно, в наименьшей степени антропогенно нагружен из всех четырех обследованных. Поселок находится на заметном удалении от крупных городов, расположен непосредственно рядом с Байкальским заповедником, и его население составляет всего ~1 тыс. чел. В пос. Новый Энхалук численность населения еще ниже (~200 чел.). Однако этот поселок — популярное туристическое место, он расположен в 25 км от устья р. Селенги, которая признано основным источником поступления различных видов загрязнений в оз. Байкал [2]. Бабушкин — достаточно крупный город в прибрежной зоне Байкала (население — 4500 чел.). В последние годы испытывают значительный приток туристов пос. Хужир и прол. Малое Море — одни из наиболее популярных туристических мест на Байкале с активным судоходством и ежегодной посещаемостью почти 600 тыс. чел. На о. Ольхон расположены автомобильные кемпинги, в которых нет налаженного обращения с

ТБО. Как следствие, они могут быть еще одним источником пластикового загрязнения водоема.

Полученные концентрации пластиковых частиц в воде обследованных районов в целом соответствуют общей картине распределения антропогенной нагрузки в этих районах. Самое малое количество пластиковых частиц обнаружено в пробе TR01 (пос. Танхой, максимальное — в пробе TR02 (г. Бабушкин). Максимальная суммарная масса частиц (46.5 мг) отмечена в пробе TR07 из прол. Малое море, минимальная — в пробе TR01 из акватории рядом с пос. Танхой (табл. 2).

Необходимо отметить, что в пробах, отобранных в районах у Байкала с высокой вероятностью загрязнения (г. Бабушкин, о. Ольхон), преобладают широкоформатные типы пластика (пленки, фрагменты), а в пробах, отобранных на удалении от вероятных крупных источников загрязнения, — волокна. Пленки распределены по акватории неоднородно. Количество пленок наиболее сильно варьирует в местах отбора проб; волокна же характеризуются более равномерным распределением (рис. 3).

Преобладания пленок в выборке не отмечено. В большинстве научных публикаций наиболее распространенным типом пластикового загрязнения поверхностных вод признано загрязнение фрагментами частиц [12, 18, 26]. Обнаруженные в байкальских пробах пленки представлены главным образом прозрачными или белыми (обесцвеченными) обрывками, предположительно, возникающими при механическом разрушении полиэтиленовой и полипропиленовой упаковки,

Таблица 3. Сравнительное содержание пластика в поверхностных водах оз. Байкал и других пресноводных водоемов (прочерк – отсутствие данных)

Водоем	Концентрация частиц, экз/км ²			Суммарная масса частиц, г/км ²			Количество тралений
	минимум	среднее	максимум	минимум	среднее	максимум	
оз. Байкал	14912	41807	75382	0.39	6.66	20.77	12
Великие озера (Гурон, Супериор, Эри) [14]	0	43000	466305	–	–	–	21
оз. Хубсугул, Монголия [16]	997	20264	44435	–	–	–	9

массово отмеченной вдоль береговой линии озера.

Сравнение данных о содержании пластиковых частиц в разных водоемах, полученных различными группами исследователей, зачастую затруднено из-за отсутствия унифицированных методик [18]. Тем не менее данные [12, 14, 16, 25] позволяют привести некоторое сравнение. Так, среднее количество частиц на единицу поверхности, полученное для Байкала (41807 частиц/км²) – достаточно высокое даже по сравнению с водоемами, имеющими большую степень антропогенной нагрузки (табл. 3). Для Великих озер (Гурон, Супериор и Эри) в [14] приведено практически идентичное содержание пластика в поверхностных водах. При этом в прибрежной зоне у этих озер проживает почти 16 млн чел., что в ~10 раз превышает население всей территории водосборного бассейна оз. Байкал. В монгольском оз. Хубсугул, расположенном в 200 км к ЮЗ от Байкала, обнаружено загрязнение микропластиком, которое в два раза ниже полученных авторами статьи оценок. Тем не менее этот показатель интерпретирован как очень высокий [16].

Необходимо учитывать, что уловистость планктонных сетей, которые применялись в настоящем исследовании, может быть иной (из-за круглого входного отверстия и буксировки в поверхностном слое воды), чем у сетей с прямоугольным устьем, например конструктивного типа “манта”, которые применяются другими исследователями.

Сравнение обследованных участков оз. Байкал по загрязнению пластиком с различными зонами Мирового Океана показывает сходный порядок величин. В исследовании Атлантического, Тихого и Индийского океанов описано содержание пластика в поверхностных водах в диапазоне 1000–100000 частиц/км² [13]. Полученная авторами настоящей статьи максимальная концентрация пластика в поверхностных водах для Байкала (75000 частиц/км²) близка к верхней границе диапазона, описанного для Мирового Океана в [13]. Величины содержания пластика в поверхностных водах оз. Байкал, по оценке авторов статьи, имеют тот же порядок, что и осредненные величины

для субтропических зон аккумуляции пластиковых отходов (“мусорных пятен”) [12]. Однако они в 20 раз выше оценок, полученных для тропических и умеренных широт теми же исследователями, и только в 8 раз ниже оценок, полученных для зоны северного тихоокеанского мусорного пятна [25].

Надо отметить, что полученные авторами данной работы оценки количественного распределения масс выделенных размерных групп (табл. 4) близки к полученным в [13]. Наибольшее расхождение наблюдается для наиболее крупной размерной группы (>4.75 мм). Этот факт может свидетельствовать о том, что количественное содержание микропластика – наиболее информативный показатель при оценке пластикового загрязнения поверхностных вод, особенно при небольшом количестве проведенных тралений. Оценка содержания макропластика прямо пропорционально и в большей степени зависит от величины выборки по сравнению с микрофракциями. Сходство результатов может свидетельствовать о подобии процессов формирования и распределения пластиковых частиц в Байкале и в Мировом океане, включая самые их разные стадии – биodeградацию и аккумуляцию на берегу [22].

Результаты анализа состава произвольно выбранных частиц пластика оказались вполне закономерны. Полиэтилен, полипропилен и полистирол относятся к наиболее массовым полимерным материалам. Они и обнаруживаются наиболее часто в поверхностных слоях воды. Другие широко распространенные полимеры – полиэтилентерефталат и поливинилхлорид – не обнаружены при анализе. Их плотность превышает плотность воды, поэтому их скорее можно обнаружить в донных отложениях [7]. Определить химический состав волокон используемыми методами было невозможно по причине их малых размеров. Поэтому их химический состав, предположительно отличающийся от состава пленок и фрагментов, остался не определенным. Известно, что волокна могут состоять из полиамидов, полиэфиров или полимеров на основе акриловой и метакриловой кислот [11].

Таблица 4. Соотношение количественных и массовых долей размерных групп пластиковых частиц в поверхностных водах пресноводных водоемов и Мирового Океана (прочерк – отсутствие данных)

Водоем, зона	Соотношение количественных долей размерных групп частиц пластика, %			Соотношение массовых долей размерных групп, %			Количество тралений
	0.33–1.00 мм	1.01–4.75 мм	>4.75 мм	0.33–1.00 мм	1.01–4.75 мм	>4.75 мм	
оз. Байкал	34.3	56.2	9.4	4.6	36.1	59.3	12
оз. Хубсугул, Монголия [16]	41.0	40.0	19.0	–	–	–	9
Северное Тихоокеанское мусорное пятно [25]	52.5	40.1	7.4	–	–	–	11
Суммарно – Атлантический, Тихий, Индийский океаны [13]	34.9	57.5	7.6	2.6	10.6	86.8	680

Наличие токсического эффекта от существующего пластикового загрязнения оз. Байкал представляется маловероятным. Токсические эффекты микро- и нанопластика в лабораторных условиях фиксировались при концентрациях пластика ≥ 0.5 мг/л [10, 20, 28, 31]. В то же время среднее содержание пластика, обнаруженное авторами настоящей статьи в поверхностном слое воды, составило всего 42.4 нг/л для всего размерного диапазона пластиковых частиц и только 17.9 нг/л – для микропластика. Таким образом, концентрации, при которых токсические эффекты наблюдались другими исследователями, превышали наблюдавшиеся авторами статьи на четыре порядка. Полученные данные могут быть занижены из-за метрологических характеристик и ограничений в ловистости сетей и из-за отсутствия оценки содержания частиц микропластика с размерами < 0.3 мм. Их количество может превышать суммарное содержание более крупных фракций, при этом с уменьшением размеров частиц пластика они получают более широкие возможности для взаимодействия с живыми организмами [21]. Также нельзя исключать возможность накопления малых частиц в тканях организмов-фильтраторов, в том числе эндемичных байкальских губок рода *Lubomirskiidae*, а также передачи токсичных соединений по трофической цепи и их накопления на ее верхних уровнях [15, 27].

Данная работа – первая оценка степени пластикового загрязнения оз. Байкал. Полученные данные относятся к участкам акватории озера с наибольшей антропогенной нагрузкой. В акватории Байкала рядом с малонаселенными северными прибрежными районами, а также на большом удалении от берега содержание пластика в поверхностных водах может заметно различаться. Кроме того, возможные последствия этого загрязнения требуют отдельной тщательной оценки.

ВЫВОДЫ

Среднее содержание пластиковых частиц в поверхностном слое воды у юго-восточного и западного побережья оз. Байкал в количественном эквиваленте соответствует высокому уровню пластикового загрязнения и сопоставимо с их содержанием в циклических зонах океанских течений.

Полученные данные следует интерпретировать как имеющие локальный характер и отнести к наиболее антропогенно нагруженным зонам водоема. Уровень пластикового загрязнения поверхностных вод в северной части озера у малонаселенных территорий, в зонах, относящихся к особо охраняемым природным территориям, может значительно отличаться от установленного в данной работе. Для получения общих оценок загрязнения оз. Байкал необходимы дальнейшие исследования, включающие в себя выполнение тралений на продольном и поперечных разрезах по всей акватории озера.

Среди обнаруженных частиц преобладают прозрачные или обесцвеченные пленки – предположительно, фрагменты разрушенной пищевой упаковки, в массе отмеченной вдоль береговой линии озера.

В составе выделенного микропластика преобладают полиэтилен, полипропилен и полистирол как наиболее распространенные полимеры, имеющие положительную плавучесть.

Количественное соотношение размерных групп пластиковых частиц, полученное для исследованной акватории, очень сходно с соотношениями, определенными для загрязненных пластиком зон Мирового Океана. Подобное совпадение может указывать на сходные механизмы появления и разрушения пластика в обследованных зонах Байкала и Мирового Океана.

Вероятно, концентрации частиц микропластика и мезопластика – наиболее информативны

для оценки пластикового загрязнения, особенно при малой выборке.

Концентрации пластика в обследованных зонах оз. Байкал на четыре порядка ниже концентраций, при которых проявлялись токсические эффекты микропластика в лабораторных условиях. Следует учесть, что полученные данные по содержанию в воде микропластика размером <0.2 мм объективно занижены в силу метрологических характеристик сетей.

Авторы выражают признательность сотрудникам АНО «Байкальский интерактивный экологический центр» (г. Иркутск) и лично М.П. Рихвановой за помощь в проведении данной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блиновская Я.Ю., Якименко А.Л. Анализ загрязнения залива Петра Великого (Японского моря) микропластиком // Успехи современного естествознания. 2018. № 1. С. 68–73.
2. Вотинцев К.К. Химический баланс оз. Байкал и некоторые аспекты прогнозирования его возможных изменений // География и природ. ресурсы. 1982. № 3. С. 50–55.
3. Грачев М.А. О современном состоянии экологической системы озера Байкал. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 153 с.
4. Зилов Е.А. Современное состояние антропогенного воздействия на озеро Байкал // Журн. сибирского федерального ун-та. 2013. № 6. С. 388–404.
5. Инфракрасная спектроскопия полимеров / Под ред. И. Деханта. М.: Химия, 1976. 472 с.
6. Федеральный закон от 01.05.1999 N 94-ФЗ «Об охране озера Байкал».
7. Andrady A.A. Persistence of plastic litter in the oceans // Marine Anthropogenic Litter / Eds M. Bergmann, L. Gutow, M. Klages. Bremerhaven: Springer, 2015. P. 57–72.
8. Arthur C., Baker J., Bamford H. In Proc. Int. Res. Workshop on the Occurrence, Effects and Fate of Microplastic Marine Debris // NOAA Technical Memorandum NOS-OR & R-30. NOAA Silver Spring. 2008. P. 530.
<https://pdfs.semanticscholar.org/e80d/0f228133223e7-d0c76266d3510d69bfd755.pdf>
9. Barnes D.K.A., Galgani F., Thompson R.C., Barlaz M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments // Philos. Trans. R. Soc. 2009. V. 364. P. 1985–1998.
10. Browne M.A., Niven S.J., Galloway T.S., Rowland S.J., Thompson R.C. Microplastic moves pollutants and additives to worms, reducing functions linked to health and biodiversity // Current Biol. 2013. V. 23. P. 2388–2392.
11. Browne M.A. Sources and pathways of microplastics to habitats // Marine Anthropogenic Litter / Eds M. Bergmann, L. Gutow, M. Klages. Bremerhaven: Springer, 2015. P. 229–244.
12. Cózar A., Martí E., Duarte C.M., García-de-Lomas J., van Sebille E., Ballatore T.J., Eguíluz V.M., González-Gordillo I.J., Pedrotti M.L., Echevarría F., Troublè R., Irigoien X. The Arctic Ocean as a dead end for floating plastics in the North Atlantic branch of the Thermohaline Circulation // Sci. Adv. 2017. V. 3. P. 1–8.
13. Eriksen M., Lebreton L.C.M., Carson H.S., Thiel M., Moore C.J., Borerro J.S., Galgani F., Ryan P.G., Reisser J. Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250000 Tons Afloat at Sea // PLoS ONE. 2014. V. 9 (12). P. 1–15.
14. Eriksen M., Mason S., Wilson S., Box C., Zellers A., Edwards W., Farley H., Amato S. Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian Great Lakes // Mar Pollut. Bull. 2013. V. 77 (1, 2). P. 177–182.
15. Farrell P., Nelson K. Trophic level transfer of microplastic: *Mytilus edulis* (L.) to *Carcinus maenas* (L.) // Env. Pollut. 2013. V. 177. P. 1–3.
16. 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. 156–63.
17. Galgani F., Leaute J. P., Moguedet P., Souplet A., Verin Y., Carpentier A. et al. Litter on the sea floor along European coasts // Mar. Pollut. Bull. 2000. V. 40. P. 516–527.
18. 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. P. 3060–3075.
19. Holmström A. Plastic films on the bottom of the Skagerrak // Nature. 1975. V. 255. P. 622–623.
20. Jeong C.-B., Kang H.M., Lee Y.H., Kim M.-S., Lee J.-S., Seo J.S., Wang M., Lee J.-S. Nanoplastic Ingestion Enhances Toxicity of Persistent Organic Pollutants (POPs) in the Monogonont Rotifer *Brachionus koreanus* via Multixenobiotic Resistance (MXR) Disruption // Env. Sci. and Tech. 2018. V. 52. P. 11411–11418.
21. Koelmans A.A., Besseling E., Shim W.J. Nanoplastics in the Aquatic Environment. Critical Review // Marine Anthropogenic Litter / Eds M. Bergmann, L. Gutow, M. Klages. Bremerhaven: Springer, 2015. P. 325–340.
22. Lebreton L., Egger M., Slat B. A global mass budget for positively buoyant macroplastic debris in the ocean // Sci. Rep. 2019. V. 9. 12922. [Электронный ресурс]. https://elibrary.ru/title_about.asp?id=33781
23. Lusher A. Microplastics in the marine environment: distribution, interactions and effects // Marine Anthropogenic Litter / Eds M. Bergmann, L. Gutow, M. Klages. Bremerhaven: Springer, 2015. P. 245–308.
24. Masura J., Baker J., Foster G., Arthur C. Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recommendations for quantifying synthetic particles in watersand sediments // NOAA Tech. Memorandum NOS-OR&R-48. 2015. 31 p.
25. 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. P. 1297–1300.
26. Morét-Ferguson S., Lavender Law K., Proskurowski G., Murphy E.K., Peacock E.E., Reddy C.M. The size, mass, and composition of plastic debris in the western North Atlantic Ocean // Mar. Pollut. Bull. 2010. V. 60. P. 1873–1878.

27. *Rochman C.M.* The Complex Mixture, Fate and Toxicity of Chemicals Associated with Plastic Debris in the Marine Environment // *Marine Anthropogenic Litter* / Eds *M. Bergmann, L. Gutow, M. Klages*. Bremerhaven: Springer, 2015. P. 117–140.
28. *Sjollema S.B., Redondo-Hasselerharm P., Leslie H.A., Kraak M.H., Vethaak A.D.* Do plastic particles affect microalgal photosynthesis and growth? // *Aquat. Toxicol.* 2016. V. 170. P. 259–261.
29. *Socrates G.* Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies. Tables and Charts. Chichester: John Wiley and Sons, 2001. 347 p.
30. *Timoshkin O.A., Samsonov D.P., Yamamuro M., Kupchinsky A.B., Bukshuk N.A.* Rapid ecological change in the coastal zone of Lake Baikal (East Siberia): Is the site of the world's greatest freshwater biodiversity in danger? // *J. of Great Lakes Res.* 2016. V. 42. P. 487–497.
31. *Zhang C., Chen X., Wang J., Tan L.* Toxic effects of microplastic on marine microalgae *Skeletonema costatum*: Interactions between microplastic and algae // *Env. Pollut.* 2017. V. 220. P. 1282–1288.
32. *Zobkov M.B., Esiukova E.E.* Microplastics in Baltic bottom sediments: Quantification procedures and first results // *Mar. Pollut. Bull.* 2017. V. 114. P. 724–732.