

УДК 574.2

СОДЕРЖАНИЕ МИКРОПЛАСТИКА В ЖЕЛУДОЧНО-КИШЕЧНОМ ТРАКТЕ НЕКОТОРЫХ ВИДОВ РЫБ оз. КУБЕНСКОЕ (ВОЛОГОДСКАЯ ОБЛ.)

© 2024 г. Н. Ю. Тропин^{a, b, *}, С. Н. Рахматуллина^a,
Е. Д. Воробьев^a, Д. С. Воробьев^a, Ю. А. Франк^a

^aНациональный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

^bВологодский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии,
Вологда, Россия

*e-mail: nikolay-tropin1@yandex.ru

Поступила в редакцию 31.10.2022 г.

После доработки 06.04.2023 г.

Принята к публикации 18.04.2023 г.

Исследовано содержание микропластика в желудочно-кишечном тракте окуня, плотвы и леща оз. Кубенское Вологодской обл. Частицы микропластика обнаружены у 60% экз. леща и 43 экз. окуня. В желудочно-кишечном тракте плотвы микропластик не зарегистрирован. Среднее количество микропластиковых частиц в леще достигало 1.6 ± 0.4 единиц на особь, у окуня — 4.2 ± 1.4 единиц микропластика на особь. Частицы микропластика в желудочно-кишечном тракте рыб представлены преимущественно волокнами с незначительной долей фрагментов и пленок. Статистически значимых различий ($p > 0.05$) в содержании микропластика в желудочно-кишечном тракте бентофагов (лещ) и эврифагов (окунь) не выявлено. Полученные данные — первое свидетельство наличия микропластика в рыбах водных объектов Вологодской обл.

Ключевые слова: микропластик, оз. Кубенское, рыбы, питание, желудочно-кишечный тракт, Вологодская обл.

DOI: 10.31857/S0320965224020103 **EDN:** xtbgi

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проблема загрязнения водных объектов МП и выявление его негативного воздействия на гидробионтов относится к актуальным направлениям современных экологических исследований (Anderson et al., 2016; Bellasi et al., 2020). Повышенная устойчивость микропластиковых частиц к внешним факторам приводит к низкой скорости их биологической деградации и длительному периоду полураспада. Это способствует поступлению и активной аккумуляции МП в водоемах на разных трофических уровнях (Hidalgo-Ruz et al., 2012; Frias, Nash, 2019). В результате исследований морских экосистем в отдельных регионах Мирового океана частицы МП обнаружены в желудочно-кишечном тракте ряда таксонов почти на каждом трофическом уровне (Bellasi et al., 2020). В наибольшей степени микропластиковые частицы аккумулируются в рыбах, которые находятся на вершинах пищевых цепей. Кроме того, изучение содержания и механизмов аккумуляции МП напрямую связано с оценкой

качества рыбной продукции и поэтому активно обсуждается исследователями (Wang et al., 2000; McNeish et al., 2018; Гушин, Веремейчик, 2019; Capone et al., 2020; Frank et al., 2020). В то же время, проведенный анализ литературных данных позволил установить значительную вариабельность концентрации микропластиковых частиц в желудочно-кишечном тракте пресноводных видов рыб (Тропин, 2022). Концентрация МП в рыбах оз. Тайху (Китай) была в среднем 1.8 ± 1.7 ед. на особь (Jabeen et al., 2017), в рыбах из эстуария р. Баия-Бланка (Аргентина) — 12.1 ± 6.2 ед. на особь (Arias et al., 2019). Наиболее интенсивное накопление микропластика в рыбе происходит в водоемах, водосбор которых занимает весьма обширные площади с крупными населенными пунктами и промышленными предприятиями (Wang et al., 2000; Capone et al., 2020; Frank et al., 2020). При исследовании содержания микропластиковых частиц в желудочно-кишечном тракте обыкновенного ельца *Leuciscus leuciscus* L. из р. Томь в Западной Сибири в районе г. Томск зафиксировано в среднем 41.6 ед./особь (Frank et al., 2020). Среднее содержание МП того же раз-

Сокращения: ед. — единицы; ЖКТ — желудочно-кишечный тракт; МП — микропластик.

мерного диапазона в *L. leuciscus* из удаленного притока р. Енисей, р. Нижняя Тунгуска было 1.5 ± 1.9 ед./особь (Frank et al., 2023).

В последние годы большое внимание уделяют изучению накопления МП в рыбах морских и пресноводных экосистем с выявлением интенсивности поглощения микропластиковых частиц в зависимости от характера питания рыб (Wang et al., 2000; McNeish et al., 2018). Установлено, что виды-эврифаги поглощают большее количество микропластика по сравнению с видами-фиитофагами и хищниками. При изучении накопления МП в рыбах оз. Мичиган (США) и его основных притоков получена значительная степень корреляции между концентрацией микропластиковых частиц в желудочно-кишечном тракте и трофической группой рыб (McNeish et al., 2018). Наиболее высоким содержанием МП характеризовался представитель семейства бычковых — бычок-кругляк *Neogobius melanostomus* P., который относится к типичным зообентофагам. Для данного вида была выявлена положительная линейная зависимость между размером тела и количеством частиц МП. При сравнительном анализе всех исследованных видов показано, что у озерных рыб содержание микропластика достоверно выше у зообентофагов по сравнению с детритофагами и эврифагами, а у эврифагов — с детритофагами. В рыбах из рек-притоков оз. Мичиган содержание микропластика было увеличено у видов-эврифагов (McNeish et al., 2018).

Несмотря на значительное количество работ, посвященных анализу содержания микропластика в пресноводных видах рыб (Eriksen et al., 2013; Wong et al., 2020; Castro-Castellon et al., 2021; Тропин, 2022), общие закономерности накопления микропластиковых частиц остаются во многом неизученными. Во внутренних водоемах Российской Федерации содержание МП в желудочно-кишечном тракте рыб с разным типом питания исследовано недостаточно.

Цель работы — дать количественную оценку содержания отдельных форм МП в желудочно-кишечном тракте различных по типу питания рыб в оз. Кубенское Вологодской обл. в зависимости от пола и размерно-возрастных параметров.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Район работ. Ихтиологический материал собирали в сентябре 2021 г. в открытой части оз. Кубенское. Водоем располагается в центральной части Вологодской обл. и относится к бассейну р. Северная Двина. Площадь водоема 417 км² со средней глубиной 2.9 м. Длина озера 54 км, наибольшая ширина 10 км (Веселова, 1977). Характерные особенности оз. Кубенское — неустойчивый уровень режим и значительная площадь водосбора (14 620 км²) с развитой гидрографиче-

ской сетью и высокой степенью заболоченности. Эти факторы во многом определяют условия обитания рыб, способствуя интенсивному накоплению в них токсикантов, в том числе и ртути (Котов и др., 1997; Тропин и др., 2019).

Рыбное население Кубенского озера представлено 15 видами рыб из пяти отрядов. Наибольшее количество видов относится к отряду карпообразных (лещ *Abramis brama* L., густера *Blicca bjoerkna* L., язь *Leuciscus idus* L., плотва *Rutilus rutilus* L., уклея *Alburnus alburnus* L., елец *Leuciscus leuciscus* L., золотой карась *Carassius carassius* L.). Окунеобразные представлены тремя видами (судак *Stizostedion lucioperca* L., окунь *Perca fluviatilis* L., ерш *Gymnocephalus cernuus* L.), лососеобразные — двумя (нельма *Stenodus leucichthys nelma* P., сиг обыкновенный *Coregonus lavaretus* L.), остальные отряды — одним видом: щукообразные (щука *Esox lucius* L.), трескообразные (налим *Lota lota* L.) и скорпенообразные (подкаменщик обыкновенный *Cottus gobio* L.) (Болотова, Воробьев, 2007). К числу наиболее многочисленных и значимых в структуре любительских и промысловых уловов относятся плотва, окунь и лещ, различных по типу питания. Это определило выбор видов в качестве объектов исследования для выявления зависимости содержания МП в их желудочно-кишечном тракте от трофической специализации.

Отбор проб. Вылов рыбы осуществляли ставными жаберными сетями с размером ячеи (30–65 мм) с общей экспозицией ~1 сут. Всего для исследования было отобрано 20 экз. речного окуня, 20 экз. плотвы и 20 экз. леща. Все отловленные экземпляры рыб подвергали полному биологическому анализу по общепринятым ихтиологическим методикам (Правдин, 1966), который проводили в Вологодском филиале Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии. В качестве регистрирующих структур для определения возраста использовали чешую и спицы первых лучей брюшного (окунь) и спинного (плотва, лещ) плавников (Чугунова, 1959; Правдин, 1966; Гдебуадзе, Чернова, 2009). Регистрирующие структуры просматривали с помощью стереомикроскопа МС-2-ZOOM вар. 1CR при увеличении в 16 и 24 раза.

Выявление и идентификация микропластиковых частиц. Выявление микропластиковых частиц осуществляли на базе Центра исследования микропластика в окружающей среде Института биологии, экологии, почвоведения, сельского и лесного хозяйства (Биологический институт) Национального исследовательского Томского государственного университета. Для исследования содержания МП у каждого экземпляра рыб изымали ЖКТ, включая пищевод, желудок и кишечник, и помещали в этикетированную пробирку с фиксацией 70%-ным раствором этилового

спирта. В лабораторных условиях проводили декантацию и выявление содержания микропластиковых частиц в каждом отдельном образце ЖКТ. Для извлечения МП из ЖКТ рыб использовали щелочной гидролиз с последующим разделением частиц по плотности (Jahan et al., 2019). Гидролиз проводили в 200 мл раствора КОН (10%) с последующим перемешиванием пробы на шейкере в термостате при температуре 55°C в течение 48 ч. После растворения тканей путем разделения раствора по плотности насыщенным раствором NaCl (~1.19 г/см³) извлекали частицы микропластика. Для устранения всплытия жира в результате омыления верхнюю фазу из делительной воронки дополнительно обрабатывали 96%-ным этиловым спиртом (10% объема пробы) (Dawson et al., 2020).

На следующем этапе проводили вакуумную фильтрацию верхней фазы через мембранные фильтры из стекловолокна с диаметром пор 0.45 мкм (MF-Millipore). Для анализа фильтров использовали световой стереомикроскоп МИКРОМЕД МС2, оснащенный цифровой камерой с программным обеспечением TourView 3.7.6273. Содержание микропластика оценивали по количеству частиц, обнаруженных в каждом ЖКТ рыб. Каждая из них идентифицирована в соответствии с ранее установленными правилами (Hidalgo-Ruz et al., 2012). Принимали во внимание следующие критерии: однородность окраски, особенности изгиба волокон и их устойчивость к механическому разрыву. Для подтверждения полимерной природы частиц использовали тест с использованием раскаленной иглы из нержавеющей стали (метод "hot needle test" (Hidalgo-Ruz et al., 2012)).

Для анализа частиц использовали классификации по форме и по размеру. Извлеченные частицы МП распределяли по форме на четыре группы: микрофрагменты, микропленки, микросферы и микроволокна (Frias, Nash, 2019). Кроме того, использовали разделение МП по размерам (длина по наибольшей оси): 0.15–0.30 мм, 0.31–1.00 мм, 1.01–2.00 мм, 2.01–3.00 мм, 3.01–4.00 мм, 4.01–5.00 мм. Размеры частиц измеряли с помощью приложения TourView 3.7.6273. Процентный состав по количеству форм и размеров микропластика определяли с использованием следующего уравнения:

$$\text{Состав (\%)} = (C_{\text{мп}}/n) \times 100,$$

где $C_{\text{мп}}$ — количество частиц МП данной формы или размера, n — общее количество частиц в анализируемом образце.

Для контроля загрязнения реактивов и атмосферного загрязнения в процессе пробоподготовки, исследовали растворы, приготовленные с дистиллированной водой из расчета 1 контроль на пять ЖКТ рыб. Вместо исследуемого образца

(ЖКТ рыб) в контроли добавляли дистиллированную и профильтрованную (0.45 мкм) воду. Все остальные манипуляции — щелочной гидролиз, разделение по плотности и прочее проводили аналогично экспериментальным образцам с теми же реактивами. Статистическую обработку и анализ полученных данных осуществляли с использованием программ Microsoft Excel v.16 и Past 4.0 (Hammer et al., 2001; Нохрин, 2018). Для оценки достоверности различий содержания микропластика в ЖКТ разных видов рыб применяли t -критерий Стьюдента (Student, 1908). Статистически достоверными считали различия при $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Получены размерно-массовые характеристики речного окуня (возраст 7–10 лет), леща (7–13 лет) и плотвы (8–14 лет), подробно представленные по возрастным группам в табл. 1. Частицы МП были обнаружены в ЖКТ 12 или у 60% особей леща, среднее количество МП было 1.6 ± 0.4 ед./особь (табл. 2). Количество окуней, у которых зарегистрированы микропластиковые частицы, было ниже — 9 особей или 43%. Среднее количество частиц микропластика для окуней достигало 4.2 ± 1.4 ед./особь. В пересчете на 1 кг массы тела среднее содержание МП в ЖКТ леща и окуня исследованных выборок было 3.4 ± 0.9 и 30.6 ± 12.1 ед./кг (табл. 2) соответственно. В ЖКТ исследованных экземпляров плотвы микропластиковые частицы не обнаружены.

Содержание МП в ЖКТ леща и окуня, а также количество частиц МП на 1 кг массы рыб достоверно не различались ($p > 0.05$). Статистически значимой корреляции между содержанием частиц МП, длиной и массой тела окуня и леща оз. Кубенское, а также возрастом рыб не обнаружено. Кроме того, не выявлено достоверных различий между самками и самцами изученных рыб.

МП, извлеченный из ЖКТ рыб, представлен преимущественно волокнами: в 91% случае для окуня и в 100% всех найденных частиц для леща (рис. 1). Фрагменты и пленки встречены только в ЖКТ окуней, их доли достигали 4 и 5% всех обнаруженных микропластиковых частиц соответственно (рис. 1, рис. 2). Микросферы в ходе исследования не были обнаружены.

Размерный состав частиц в ЖКТ леща и окуня исследованных выборок представлен на рис. 1. Для леща большая часть выявленного МП приходилась на частицы размером 1.01–2.00 мм (41%) и 2.01–3.00 мм (30%). Доля более мелких частиц (0.15–1.0 мм) была ~17%. Лещи содержали волокна размером 4.01–5.00 мм, доля которых была 12% суммы всех частиц. В ЖКТ окуня соотношение микропластиковых частиц размером

1.01–2.00 мм и 2.01–3.00 мм достигало 39 и 24% соответственно. Доля более мелких частиц (0.15–1.0 мм) в ЖКТ окуня была выше (21%), чем у леща. Кроме того, в ЖКТ окуней встречен МП с размерами 3.01–4.00 мм (9%) и 4.01–5.00 мм (7%) (рис. 1).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные предварительные результаты по содержанию микропластиковых частиц в желудочно-кишечном тракте рыб оз. Кубенское свидетельствуют о наличии МП в водоемах Вологодской обл. Количественные параметры его содержания у пресноводных рыб (лещ — 1.6 ± 0.4 ед./особь, окунь — 4.2 ± 1.4 ед./особь) сопоставимы со значениями, выявленными при исследовании морских рыб: султанки обыкновенной *Mullus barbatus* L. (1.5 ± 0.5 ед./особь) (Bellas et al., 2016), анчоуса европейского *Engraulis encrasicolus* L. (<1.0 ед./особь) (Carone et al., 2020),

а также лаврака обыкновенного *Dicentrarchus labrax* L., ставриды обыкновенной *Trachurus trachurus* L. и скумбрии африканской *Scomber colias* G. (1.3 ± 2.5 ед./особь) (Barboza et al., 2020). Однако относительно пресноводных видов рыб из водоемов других регионов мира, содержание частиц МП в леще и окуне оз. Кубенское сравнительно меньше (табл. 3).

Высокий уровень содержания МП в ЖКТ пресноводных рыб в сравнении с морскими обусловлен локальностью рек и озер, и их расположением вблизи от крупных населенных пунктов и промышленных центров. Усиление кумуляции МП в компонентах биоты может наблюдаться в лотических системах, которые характеризуются большой протяженностью и повышенной скоростью течения. Соответственно, речные рыбы более восприимчивы к проглатыванию МП, поступающего в водотоки в виде пластиковых отходов. Так, по данным (Wong et al., 2020), МП чаще встречался в донных отложениях и биотических

Таблица 1. Размерно-массовая характеристика разновозрастных рыб оз. Кубенское

Возраст, лет	Окунь ($n=20$)		Лещ ($n=20$)		Плотва ($n=20$)	
	длина, см	масса, г	длина, см	масса, г	длина, см	масса, г
6+	<u>18–21</u> 20.2 ± 0.36	<u>96–171</u> 140.8 ± 8.1	25	<u>286–308</u> 297.0 ± 11.0	—	—
7+	22	<u>162–189</u> 171.3 ± 6.0	<u>24–28</u> 26.0 ± 2.8	<u>246–412</u> 329.0 ± 83.0	<u>18–19</u> 18.5 ± 0.5	<u>104–106</u> 105.0 ± 1.0
8+	<u>22–25</u> 23.2 ± 0.4	<u>170–286</u> 205.0 ± 17.4	<u>26–35</u> 28.1 ± 1.0	<u>326–812</u> 437.5 ± 57.7	<u>19–20</u> 19.33 ± 0.3	<u>110–134</u> 122.7 ± 6.9
9+	27	300	34	706	<u>21–22</u> 21.2 ± 0.3	<u>170–250</u> 200.7 ± 24.9
10+	—	—	<u>35–38</u> 36.7 ± 0.8	<u>872–1058</u> 937.3 ± 60.4	23	224
11+	—	—	<u>33–41</u> 37.0 ± 4.0	<u>732–1280</u> 1006.0 ± 274.0	<u>23–26</u> 24.3 ± 0.8	<u>222–340</u> 284.7 ± 34.2
12+	—	—	<u>38–41</u> 39.5 ± 1.5	<u>1094–1362</u> 1228.0 ± 134.0	<u>24–28</u> 26.2 ± 0.6	<u>284–424</u> 375.2 ± 26.9
13+	—	—	—	—	28	442
в среднем	21.8 ± 0.4	174 ± 10.9	31.2 ± 1.2	637 ± 79.3	23.0 ± 0.7	253 ± 26.7

Примечание. Над чертой — минимальное и максимальное значения, под чертой — средние значения и их ошибки ($M \pm m$), “—” — данные отсутствуют, n — число исследованных особей.

Таблица 2. Содержание частиц МП в рыбах оз. Кубенское

Показатель	Количество частиц МП/1 экз. рыб		Количество частиц МП/1 кг массы рыб	
	Лещ	Окунь	Лещ	Окунь
Содержание частиц микропластика	<u>0.0–5.5</u> 1.6 ± 0.4	<u>0.0–23.3</u> 4.2 ± 1.4	<u>0.0–12.4</u> 3.4 ± 0.1	<u>0.0–182.9</u> 30.6 ± 12.1
σ	1.8	6.6	4.0	55.3
C_v	1.0	1.5	0.8	0.5

Примечание. σ — стандартное отклонение, C_v — коэффициент вариации.

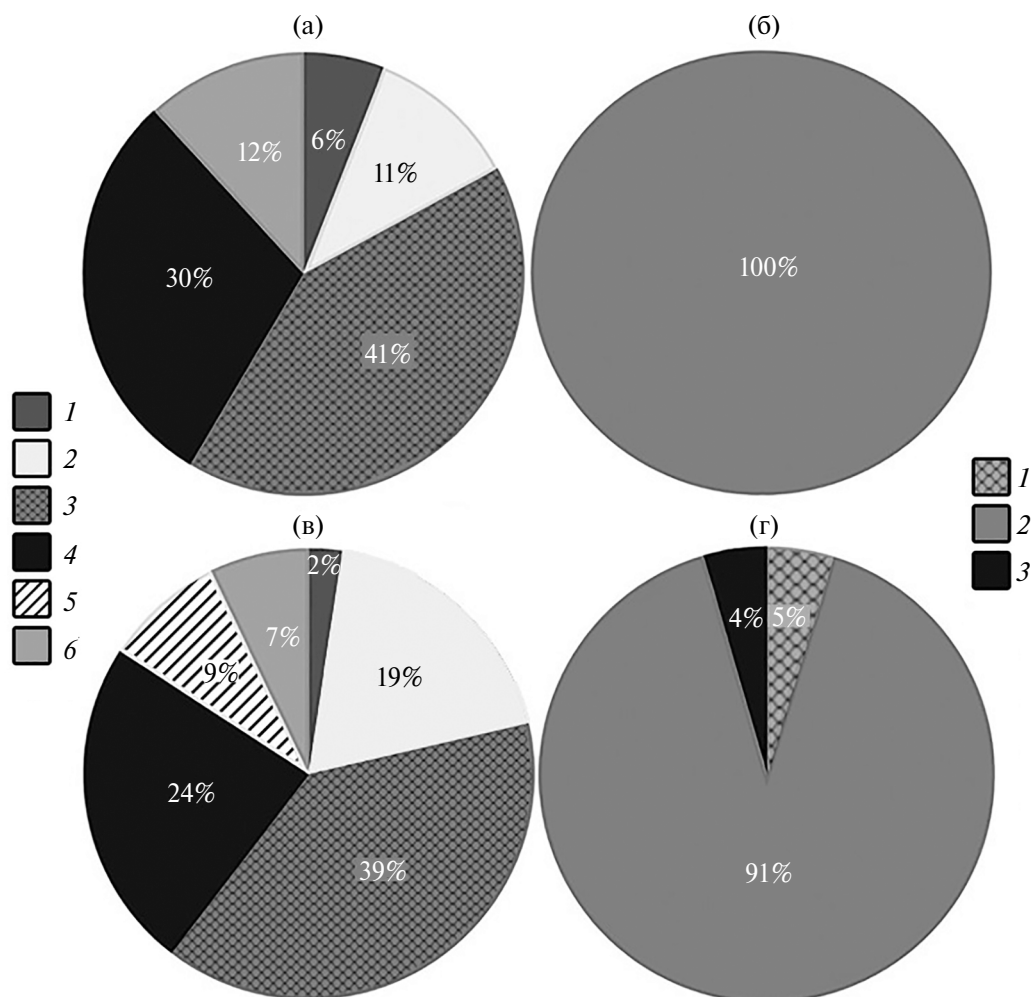


Рис. 1. Распределение частиц микропластика по размеру: 1 – 0.15–0.30; 2 – 0.31–1.00; 3 – 1.01–2.00; 4 – 2.01–3.00; 5 – 3.01–4.00; 6 – 4.01–5.00 (а, в) и форме: 1 – пленки; 2 – волокна; 3 – фрагменты (б, г) в ЖКТ исследованных особей *Abramis brama* (а, б) и *Perca fluviatilis* (в, г).

компонентах районов с высокой плотностью населения или близких к городским центрам. Исследование МП в нейстоне Великих Лавrentийских озер объяснило большую пространственную изменчивость загрязнения высокой плотностью населения (Eriksen et al., 2013).

Кубенское озеро расположено в центральной части Вологодской обл. и удалено от областного центра (г. Вологда) на расстояние 20 км. По берегам водоема, а также на берегах многочисленных водотоков, впадающих в озеро, располагается большое количество сельских населенных пунктов, которые служат потенциальными источниками поступления пластикового мусора через хозяйственно-бытовые и коммунальные стоки. Высокая рыбохозяйственная ценность оз. Кубенское определяет интенсивный лов рыбы ставными сетями, эксплуатация которых (разрыв и истирание) приводит к накоплению микропластиковых

частиц в водоеме. В то же время, удаленность оз. Кубенское от крупных городов и отсутствие таковых непосредственно в прибрежной зоне способствует снижению уровня пластикового загрязнения водоема, что приводит к незначительному накоплению МП в рыбах.

Микропластиковые частицы были обнаружены в ЖКТ у >50% исследованных нами экземпляров леща и у каждого четвертого экземпляра окуня (25%). Статистически значимых различий по количеству частиц микропластика в ЖКТ леща и окуня обнаружить не удалось ($p > 0.05$). Уровень микропластиковых частиц в ЖКТ леща характерен для пресноводных рыб.

В оз. Кубенское окунь выступает типичным эврифагом, закономерно сменяя компонентный состав питания по мере роста: от зоопланктона к зообентосу и потреблению рыб (Тропин, 2008, 2020). Его пищевая пластичность связана

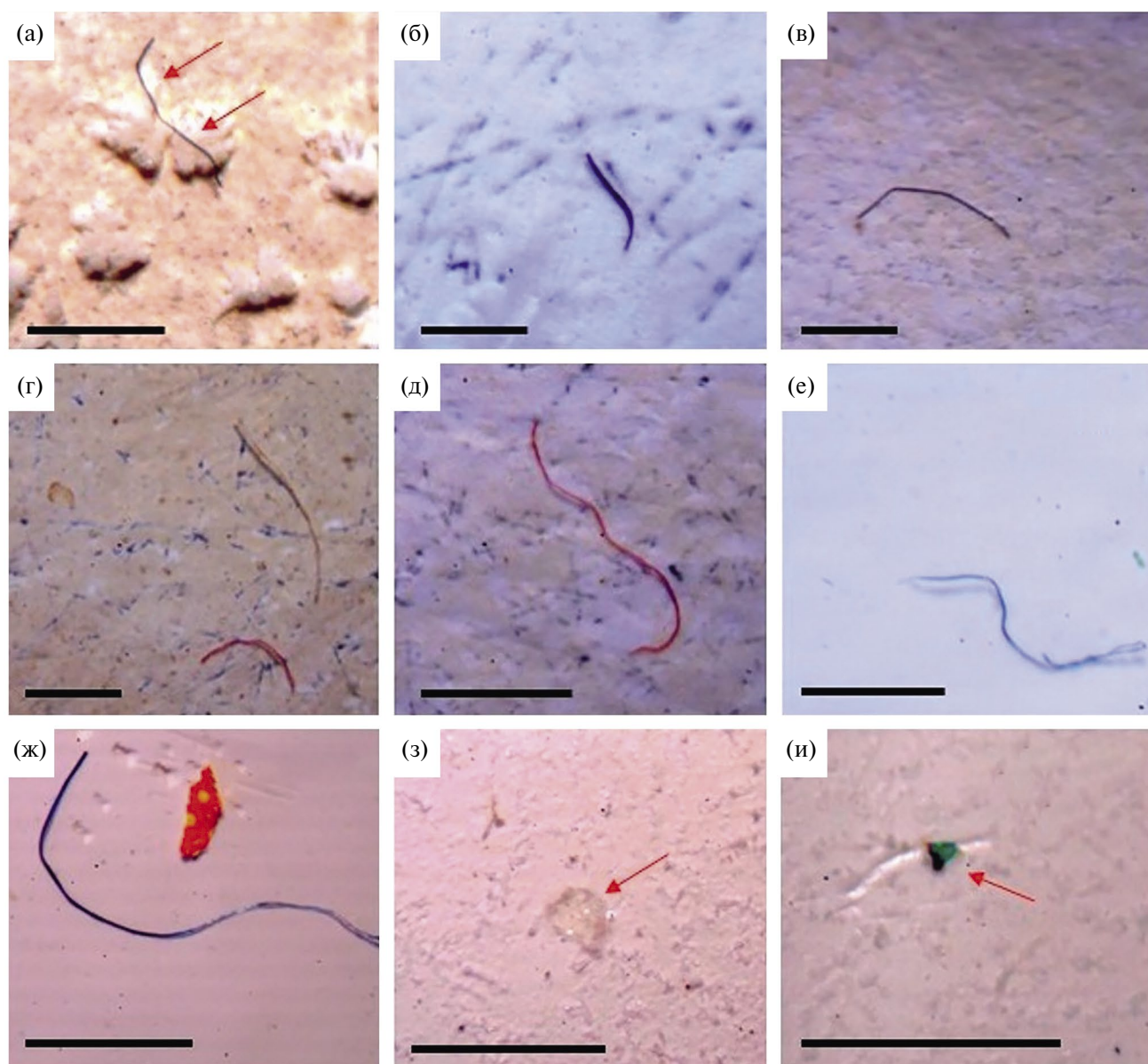


Рис. 2. Частицы микропластика, найденные в ЖКТ *Abramis brama* (а–в, е) и *Perca fluviatilis* (г, д, ж–и). Масштабная линейка равна 1 мм.

с быстрым переходом на потребление бентосных и планктонных организмов в условиях невозможности активного хищничества. Таким образом, содержание микропластиковых частиц в ЖКТ окуня (4.2 ± 1.4 ед./особь) относительно леща отражает его эврифагию.

Лещ, типичный бентофаг в оз. Кубенское и других сходных водных объектах, потребляет преимущественно личинок хирономид, а также моллюсков (Щербина, 2021). В наибольшей степени частицы МП аккумулируются на дне водных объектов и попадают в ЖКТ леща вместе с бентосом и детритом. Очевидно, характер питания леща в оз. Кубенское способствует накоплению

им МП. Схожие тенденции показаны в работах ряда авторов по накоплению МП в рыбах Северной Атлантики, оз. Мичиган и р. Томь (McNeish et al., 2018; Barboza et al., 2020).

У исследованных особей плотвы не обнаружено ни одного экземпляра, в ЖКТ которого регистрировали бы микропластиковые частицы. Плотва в оз. Кубенское питается зоопланктоном, высшей водной растительностью и бентосными организмами. В связи с активным потреблением моллюсков, в частности дрейссены *Dreissena polymorpha* Р., которая образует многочисленные скопления (Щербина, 2008), можно было бы ожидать высокий уровень содержания

Таблица 3. Содержание МП в ЖКТ пресноводных рыб из разных регионов мира

Водный объект	Метод идентификации	Доля особей, содержащих МП, %	Содержание МП, ед./особь	Литературный источник
Эстуарий р. Амазонка (Бразилия)	Визуальный; ИК-Фурье спектроскопия	189 (13.8)	1.2 ± 5.0	(Pegado et al., 2018)
р. Темза (Великобритания)	Визуальный; Рамановская спектроскопия	64 (33)	0.6 ± 1.2	(Horton et al., 2018)
р. Чжуцзян (Жемчужная река) с притоками (Китай)	Микроскопия, совмещенная с ИК-Фурье спектроскопией	279 (50)	7.0 ± 23.8	(Zheng et al., 2019)
оз. Элейел (Нигерия)	Визуальный (флуоресцентная микроскопия)	109 (69.7)	$1.0 - 6.0$	(Adeogun et al., 2020)
Ручей Васкана-Крик (Канада)	Визуальный	181 (73.5)	3.2	(Campbell et al., 2017)
Притоки оз. Мичиган (США)	Визуальный; ИК-Фурье спектроскопия	74 (90.5)	10.0 ± 2.3 ; $13.0 \pm 1.6^*$	(McNeish et al., 2018)
оз. Тайху (Китай)	Визуальный; ИК-Фурье спектроскопия	108 (95.7)	1.8 ± 1.7 ; $3.8 \pm 2.0^*$	(Jabeen et al., 2017)
Эстуарий р. Баия-Бланка (Аргентина)	Визуальный (флуоресцентная микроскопия)	20 (100)	12.1 ± 6.2	(Arias et al., 2019)
р. Томь (Россия)	Визуальный	13 (100)	41.6	(Frank et al., 2020)
р. Енисей (Россия)	Визуальный; Рамановская спектроскопия	40 (60)	1.6 ± 2.0	(Frank et al., 2023)

Примечание. * – приведены результаты исследования, полученные разными методами.

микропластиковых частиц в ЖКТ плотвы. Однако проведенное исследование не подтвердило это предположение. Поэтому дальнейшее изучение содержания микропластика в ЖКТ необходимо проводить для видов рыб, различающихся по особенностям питания, размерно-возрастным показателям и обитающим в разнотипных водных объектах Вологодской обл.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В оз. Кубенское Вологодской обл. частицы микропластика были обнаружены у 60% экземпляров леща и 43% экземпляров окуня. В ЖКТ плотвы МП не зарегистрирован. Среднее содержание микропластиковых частиц в ЖКТ леща достигало 1.6 ± 0.4 , окуня — 4.2 ± 1.4 ед./особь. В пересчете на 1 кг массы тела среднее содержание МП в ЖКТ леща и окуня исследованных выборок было 3.4 ± 0.9 и 30.6 ± 12.1 ед. соответственно. Различия в содержании частиц в ЖКТ двух видов рыб оказались статистически недостоверными ($p > 0.05$). МП, извлеченный из ЖКТ рыб, был представлен преимущественно волокнами. Большинство частиц попадало в размерный диапазон 1001–2000 мкм. Статистически значимой корреляции между содержанием частиц МП и биологическими показателями рыб (длина и масса тела, возраст, пол) на изученных выборках не уста-

новлено. Не выявлено статистически значимых различий ($p > 0.05$) в содержании микропластика в зависимости от типа питания у бентофагов (лещ) и эврифагов (окунь).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам Вологодского филиала Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии за помощь в сборе и обработке ихтиологического материала.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет–2030), проект № 2.2.3.22 ОНГ, а также в рамках Государственного задания Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии № 076-00007-22-00.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Болотова Н.Л., Воробьев Г.А. 2007. Озеро Кубенское // Природа Вологодской области. Вологда: Изд. Дом Вологжанин. С. 137.

- Веселова М.Ф. 1977. Природные условия бассейна оз. Кубенского // Озеро Кубенское. Л.: Наука. Ч. 1. С. 5.
- Гущин А.В., Веремейчик Я.В. 2019. Микропластик в пище балтийской песчанки *Ammodytes tobianus* литорали Куршской косы Балтийского моря // Вопр. ихтиологии. Т. 59. № 4. С. 492. <https://doi.org/10.1134/S004287521904009X>
- Дгебуадзе Ю.Ю., Чернова О.Ф. 2009. Чешуя рыб как диагностическая и регистрирующая структура. М.: Тов-во науч. изд. КМК.
- Комов В.Т., Лазарева В.И., Степанова И.К. 1997. Антропогенное закисление малых озер севера Европейской части России // Биология внутр. вод. № 3. С. 5.
- Нохрин Д.Ю. 2018. Лабораторный практикум по биостатистике. Челябинск: Изд-во Челябинск. гос. ун-та.
- Правдин И.Ф. 1966. Руководство по изучению рыб. М.: Пищ. пром-сть.
- Тропин Н.Ю. 2008. Окунь в крупных водоемах Вологодской области // Рыбоводство и рыбн. хоз-во. № 10. С. 29.
- Тропин Н.Ю. 2020. Эколого-биологические особенности и промысловое значение речного окуня (*Perca fluviatilis* L., 1758) в крупных рыбохозяйственных водоемах Вологодской области: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Томск. С. 24.
- Тропин Н.Ю. 2022. Пищевые стратегии пресноводных рыб и потребление ими микропластика // Матер. I Всерос. конф. с междунар. участием по загрязнению окружающей среды микропластиком "MicroPlasticsEnvironment-2022" (МРЕ-2022). Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та. С. 106.
- Тропин Н.Ю., Борисов М.Я., Угрюмова Е.В. и др. 2019. Содержание ртути в мышечной ткани речного окуня (*Perca fluviatilis* (L.)) крупных водоемов Вологодской области // Токсикол. вестн. № 2. С. 53. <https://doi.org/10.36946/0869-7922-2019-2-53-58>
- Чугунова Н.И. 1959. Руководство по изучению возраста и роста рыб. М.: Советская наука.
- Шербина Г.Х. 2008. Структура биоценоза *Dreissena polymorpha* (Pallas) и роль моллюска в питании плотвы *Rutilus rutilus* (Linnaeus) // Биология внутр. вод. № 4. С. 72.
- Шербина Г.Х. 2021. Сравнительный анализ пищевого спектра леща *Abramis brama* L. (Cyprinidae, Pisces) на разнотипных участках Рыбинского водохранилища // Биология внутр. вод. № 5. С. 511. <https://doi.org/10.31857/S0320965221040124>
- Adeogun A.O., Ibor O.R., Khan E.A., et al. 2020. Detection and occurrence of microplastics in the stomach of commercial fish species from a municipal water supply lake in southwestern Nigeria // Environ. Sci. Pollut. Res. № 27. P. 31035. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09031-5>
- Anderson J.C., Park B.J., Palace V.P. 2016. Microplastics in aquatic environments: Implications for Canadian ecosystems // Environ. Pollut. V. 218. P. 269. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.06.074>
- Arias A.H., Ronda A.C., Oliva A.L. et al. 2019. Evidence of microplastic ingestion by fish from the Bahía Blanca Estuary in Argentina, South America // Bull. Environ. Contam. Toxicol. № 102. P. 750. <https://doi.org/10.1007/s00128-019-02604-2>
- Barboza L.G.A., Lopes C., Oliveira P. et al. 2020. Microplastics in wild fish from North East Atlantic Ocean and its potential for causing neurotoxic effects, lipid oxidative damage, and human health risks associated with ingestion exposure // Sci. Total Environ. V. 717. P. 134625. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134625>
- Bellas J., Martínez-Armental J., Martínez-Cámara A. et al. 2016. Ingestion of microplastics by demersal fish from the Spanish Atlantic and Mediterranean coasts // Mar. Pollut. Bull. V. 109. P. 55. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.026>
- Bellasi A., Binda G., Pozzi A. et al. 2020. Microplastic Contamination in Freshwater Environments: A Review, Focusing on Interactions with Sediments and Benthic Organisms // Environments. V. 7. Is. 4. <https://doi.org/10.3390/environments7040030>
- Campbell S.H., Williamson P.R., Hall B.D. 2017. Microplastics in the gastrointestinal tracts of fish and the water from an urban prairie creek // FACETS. № 2. P. 395. <https://doi.org/10.1139/facets-2017-0008>
- Capone A., Petrillo M., Misic C. 2020. Ingestion and elimination of anthropogenic fibres and microplastic fragments by the European anchovy (*Engraulis encrasicolus*) of the NW Mediterranean Sea // Mar. Biol. V. 167. P. 166. <https://doi.org/10.1007/s00227-020-03779-7>
- Castro-Castellon A.T., Horton A.A., Hughes J.M.R. et al. 2021. Ecotoxicity of microplastics to freshwater biota: Considering exposure and hazard across trophic levels // Sci. Total Environ. V. 816. P. 151638. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151638>
- Dawson A.L., Motti C.A. and Kroon F.J. 2020. Solving a sticky situation: Microplastic analysis of lipid-rich tissue // Front Environ. Sci. V. 8. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.563565>
- Eriksen M., Mason S., Wilson S. et al. 2013. Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian Great Lakes // Mar. Pollut. Bull. V. 77. P. 177. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.10.007>
- Frank Yu.A., Vorobiev E.D., Babkina I.B. et al. 2020. Microplastics in fish gut, first records from the Tom River in West Siberia, Russia // Вестн. Томск. гос. ун-та. Биология. № 52. С. 130. <https://doi.org/10.17223/19988591/52/7>
- Frank Yu., Vorobiev D., Mandal A. et al. 2023. Freshwater Fish Siberian Dace Ingest Microplastics in the Remote Yenisei Tributary // Toxics. V. 11. Iss. 38. <https://doi.org/10.3390/toxics11010038>
- Frias J.P.G.L., Nash R. 2019. Microplastics: Finding a consensus on the definition // Mar. Pollut. Bull. V. 138. P. 145. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.022>
- Hidalgo-Ruz V., Gutow L., Thompson R.C. et al. 2012. Microplastics in the marine environment: a review of the

- methods used for identification and quantification // Environ. Sci. Technol. V. 46(6). P. 3060.
https://doi.org/10.1021/es2031505
- Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. 2001. Past: palaeontological statistics software package for education and data analysis // Palaeontologica Electronica. V. 1. P. 49. https:// Palaeoelectronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm (дата обращения: 05.12.2022).
- Jabeen K., Su L., Li J.N. et al. 2017. Microplastics and mesoplastics in fish from coastal and fresh waters of China // Environ. Pollut. V. 221. P. 141.
https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.11.055
- Jahan S., Strezov V., Weldekidan H. et al. 2019. Interrelationship of microplastic pollution in sediments and oysters in a seaport environment of the eastern coast of Australia // Sci. Total Environ. V. 695. P. 133924.
https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133924
- McNeish R.E., Kim L.H., Barrett H.A. et al. 2018. Microplastic in riverine fish is connected to species traits // Scientific Reports. V. 8:11639.
https://doi.org/10.1038/s41598-018-29980-9
- Horton A.A., Jürgens M.D., Lahive E. et al. 2018. The influence of exposure and physiology on microplastic ingestion by the freshwater fish *Rutilus rutilus* (roach) in the River Thames, UK // Environ. Pollut. V. 236. P. 188.
https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.044
- Pegado T.S.E.S., Schmid K., Winemiller K.O. et al. 2018. First evidence of microplastic ingestion by fishes from the Amazon River estuary // Mar. Pollut. Bull. V. 133. P. 814.
https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.06.035
- Student S. 1908. The probable error of a mean // Biometrika. V. 6. № 1. P. 1.
- Wang W., Ge J., Yu X. 2000. Bioavailability and toxicity of microplastics to fish species: A review // Ecotoxicol. Environ. Saf. V. 189. P. 109913.
https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109913
- Wong J.K.H., Lee K.K., Tang K.H.D. et al. 2020. Microplastics in the freshwater and terrestrial environments: Prevalence, fates, impacts and sustainable solutions // Sci. Total Environ. V. 719. P. 137512.
https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137512
- Zheng K., Fan Y., Zhu Z. et al. 2019. Occurrence and species-specific distribution of plastic debris in wild freshwater fish from the Pearl River catchment, China // Environ. Toxicol. Chem. V. 38. P. 1504.
https://doi.org/10.1002/etc.4437

Microplastic Content in the Gastrointestinal Tract of Some Fish Species of Lake Kubenskoe (Vologda Oblast)

N. Y. Tropin^{1, 2, *}, S. N. Rakhmatullina¹, E. D. Vorobiev¹, D. S. Vorobiev¹, Yu. A. Frank¹

¹Tomsk State University, Tomsk, Russia

²Vologda Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Vologda, Russia

*e-mail: nikolay-tropin1@yandex.ru

Quantitative assessment of microplastic content in the gastrointestinal tract of perch, roach and bream of Kubenskoe Lake in the Vologda region was conducted. Microplastics were detected in 60% of bream specimens and 43% of perch specimens. No plastic microparticles were found in the gastrointestinal tract of the roach. It was found average number of microplastic particles was 1.6 ± 0.4 items per individual of bream, and 4.2 ± 1.4 items of microplastic per individual of perch. Microplastics in the gastrointestinal tract of fish were mainly represented by fibers with a small proportion of fragments and films. No significant differences ($p > 0.05$) in the content of microplastics in the gastrointestinal tract of benthivorous (bream) and euryphage (perch) were found. The data obtained are the first evidence of the presence of microplastics in fish of the Vologda Oblast water bodies.

Keywords: microplastics, Kubenskoe Lake, fish, feeding, gastrointestinal tract, Vologda Region