

УДК 504.054

МИКРОПЛАСТИК В АБИОТИЧЕСКИХ И БИОТИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТАХ МЕШИНСКОГО ЗАЛИВА КУЙБЫШЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА (РЕСПУБЛИКА ТАТАРСТАН)

© 2024 г. Н. Ю. Степанова^{a,*}, К. А. Шевчук^a, Л. С. Кузьмин^a, А. Р. Гайсин^a

^aКазанский федеральный университет, Казань, Россия

*e-mail: step090660@yandex.ru

Поступила в редакцию 02.12.2022 г.

После доработки 19.12.2023 г.

Принята к публикации 29.01.2024 г.

Выявлено содержания микропластика в воде (20.5 ± 22.3 ед./м³), донных отложениях (44.7 ± 41.8 ед./кг), жабрах (12.3 ± 8.4 ед./экз.) и желудочно-кишечном тракте (14.5 ± 11.5 ед./экз.) леща (*Abramis brama* L., 1758) в устье р. Меша, правом притоке р. Камы. В пробах воды, в жабрах и желудочно-кишечном тракте рыб преобладали нити, в донных отложениях — фрагменты. Корреляционный анализ показал наличие отрицательной связи между содержанием микропластика в жабрах и желудочно-кишечном тракте и биологическими показателями исследованных рыб. По частоте встречаемости и содержанию микропластика в жабрах и желудочно-кишечном тракте загрязнение исследованных рыб относится к высокому уровню по сравнению с литературными данными, что связано с особенностями пищевого поведения леща.

Ключевые слова: микропластик, вода, донные отложения, лещ *Abramis brama*, Куйбышевское водохранилище

DOI: 10.31857/S0320965224040157, **EDN:** YIPKQY

ВВЕДЕНИЕ

Производство пластика в мире постоянно увеличивается. Различные изделия из пластика стали обычным явлением в повседневной жизни людей. За последние 40 лет использование пластмасс увеличилось в 25 раз благодаря минимальной стоимости, долговечности, низкой массе и эластичности (Sutherland et al., 2016). Во всем мире пластмассы широко используют в упаковке пищевых продуктов, строительстве, автомобильных изделиях, электрических устройствах, домашних видах спорта и отдыха, сельском хозяйстве, здравоохранении и пластиковой мебели (Bhuayan, 2022).

По данным (Ma et al., 2020), ~6300 млн т пластиковых отходов было произведено в период с 1950 по 2015 гг., в 2018 г. — ~359 млн т. Часть их в итоге поступила в окружающую среду, где пластик фрагментировался до микрочастиц под воздействием физико-химических факторов. За счет малого размера МП легко заглатывается животными и перемещается по пищевой цепи в организмы более высокого трофического уровня, включая человека (Никитин и др., 2019). МП оказывает не только физическое воздействие на ор-

ганизм, вызывая угнетение роста и развития, но представляет токсическую опасность, поскольку выступает сорбентом, аккумулируя на своей поверхности высокотоксичные соединения.

В пресноводные экосистемы МП поступает преимущественно с поверхностным стоком, коммунальными сточными водами и отходами, несанкционированно размещенными в водохранилище.

Основная часть публикаций посвящена исследованию МП в морских экосистемах и недостаточно изучено его содержание в реках и озерах (Никитин и др., 2019).

Цель работы — оценить содержание микропластика в воде, донных отложениях, жабрах и ЖКТ бентосоядных рыб (лещ *Abramis brama* L., 1758) в Мешинском заливе Куйбышевского водохранилища.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Река Меша — правый приток р. Камы, впадает в Камский залив Куйбышевского водохранилища. Длина реки 204 км, ширина колеблется от 30 м до 2–3 км. Скорость течения ~1–2 м/с. Глубина реки 0.2–0.6 м. Площадь бассейна 4180 км² (Водные..., 2006). Река испытывает антропогенную

Сокращения: ДО — донные отложения, ЖКТ — желудочно-кишечный тракт, МП — микропластик.

нагрузку со стороны сельскохозяйственных и коммунальных предприятий.

Мешинский залив находится в северной части Волжско-Камского плеса, имеет воронкообразную форму, сужаясь к северу, и представляет собой затопленное водное расширение р. Меша и ее пойменных приустьевых участков площадью ~120 км². Залив имеет большое количество мелководных участков и островов, особенно в его предустьевой части, которые представляют собой бывшие пойменные дюны и луговые террасы, расположенные в основном вдоль водораздельной гряды между руслами рек Меша и Камы (Структура..., 1980). В прибрежной части Мешинского залива нерестится в среднем ~40% всего рыбного населения Куйбышевского водохранилища, кроме нереста здесь происходит и нагул рыбы (Северов и др., 2018).

Пробы отбирали в мае и сентябре 2021 г. в Мешинском заливе Куйбышевского водохранилища (рис. 1). Воду объемом 100 л пропускали через планктонную сеть (размер отверстия 100 мкм) с объемом стакана 100 мл, донные отложения отбирали штанговым дночерпателем ГР-91 в прибрежной зоне. Рыбу (леща *Abramis brama*) отлавливали в прибрежье, около островов и в открытой части Мешинского залива на станции контрольного лова Татарского филиала Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии ("ВНИРО") сетями с ячейей 30, 45 и 65 мм. Выбор рыбы для анализа на содержание МП осуществляли случайным образом. Возраст отобранной рыбы – 6–7 лет, средняя масса – 695 ± 256 г, длина – 30.1 ± 3.7 см. Общее количество отобранных проб: воды – 20, донных отложений – 8, рыбы – 15 шт.

Подготовку проб воды и донных отложений проводили по методике, описанной в работе (Зобков, Есюкова, 2017). У каждого экземпляра рыбы выделяли жабры и ЖКТ, взвешивали, заливали 10%-ным раствором КОН в соотношении 1 : 20 сырой массы и выдерживали на водяной бане при температуре 40°C в течение 48 ч (Santana et al., 2021). Раствор с ЖКТ и жабрами фильтровали последовательно через металлические сита с размером ячейки 2 мм и 100 мкм, далее промывали 70%-ным раствором этилового спирта для удаления жира. Частицы МП идентифицировали под микроскопом, размер определяли при помощи окуляра-микрометра.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ полученных данных показал, что МП был обнаружен во всех средах. Частота встречаемости МП в пробах воды, ДО, жабрах и ЖКТ рыбы различалась (рис. 2). В воде из 20 отобранных проб воды МП был выявлен в 13 (65%), из

15 проб жабр рыб МП отмечен в 14 (93%), в ДО и ЖКТ рыб МП обнаружен во всех проанализированных пробах (100%).

В воде содержание МП в среднем было 20.5 ± 22.3 ед./м³, со средним размером частиц по длине 2074.1 ± 1885.9 мкм. Масса частиц, рассчитанная по зависимости между площадью и массой МП в работе (Mukhanov, 2019), в среднем достигала 1347.4 ± 1479.7 мкг (табл. 1).

В донных отложениях рассчитанная масса МП была 44.7 ± 41.8 ед./кг, длина в среднем – 145.4 ± 212.9 мкм с преобладанием частиц со средней массой 24.6 ± 42.9 мкг/кг.

Количество МП в пересчете на экземпляр составило 12.3 ± 8.4 и 14.5 ± 11.5 ед./экз. в жабрах и ЖКТ рыб соответственно. Длина частиц МП достигала 334.5 ± 408.9 мкм в жабрах и 292.7 ± 358.1 мкм в ЖКТ, масса частиц – 121.9 ± 227.6 мкг в жабрах и 198.9 ± 409.2 мкг в ЖКТ.

Анализ данных по видам частиц микропластика показал, что наиболее часто в воде и в рыбе обнаруживали нити (рис. 3). В ДО преобладали фрагменты, в пробах воды пленка отсутствовала, в жабрах и ЖКТ рыб на нее приходилось 18 и 13% соответственно.

Частицы МП по своему виду значительно отличались в пробах воды и ДО (рис. 3). Основная часть (87.5%) МП присутствовала в воде в виде нитей, в ДО – в виде фрагментов (75.8%). Последние в силу физических свойств легче оседают и накапливаются в ДО, а нити, обладающие высокой плавучестью, легко перемещаются с током воды.

Наибольший вклад в пробах воды внесли частицы МП размером >900 мкм, в ДО большая доля приходилась на частицы размером <100 мкм, в жабрах и ЖКТ рыб ≥50% МП было представлено частицами с размером <200 мкм (рис. 4).

Распределение МП по видам в абиотических и биотических компонентах повлияло на средний размер частиц по длине и массе. Преобладание нитей в воде определило средние размеры: длина частиц МП, в основном, находилась в диапазоне >900 мкм. В ДО преобладали фрагменты, раз-

Таблица 1. Содержание и характеристика частиц МП в воде (ед./м³), донных отложениях (ед./кг), жабрах (ед./экз.) и ЖКТ рыб (ед./экз.)

Вид пробы	Содержание	Масса, мкг	Длина, мкм
Вода	20.5 ± 22.3	1347.4 ± 1479.7	2074.1 ± 1885.9
ДО	44.7 ± 41.8	24.6 ± 42.9	145.4 ± 212.9
Жабры	12.3 ± 8.4	121.9 ± 227.6	334.5 ± 408.9
ЖКТ	14.5 ± 11.5	198.9 ± 409.2	292.7 ± 358.1

Примечание. ДО – донные отложения, Ж – жабры, ЖКТ – желудочно-кишечный тракт рыб. Даны среднее значение $\pm$ среднеквадратическое отклонение.

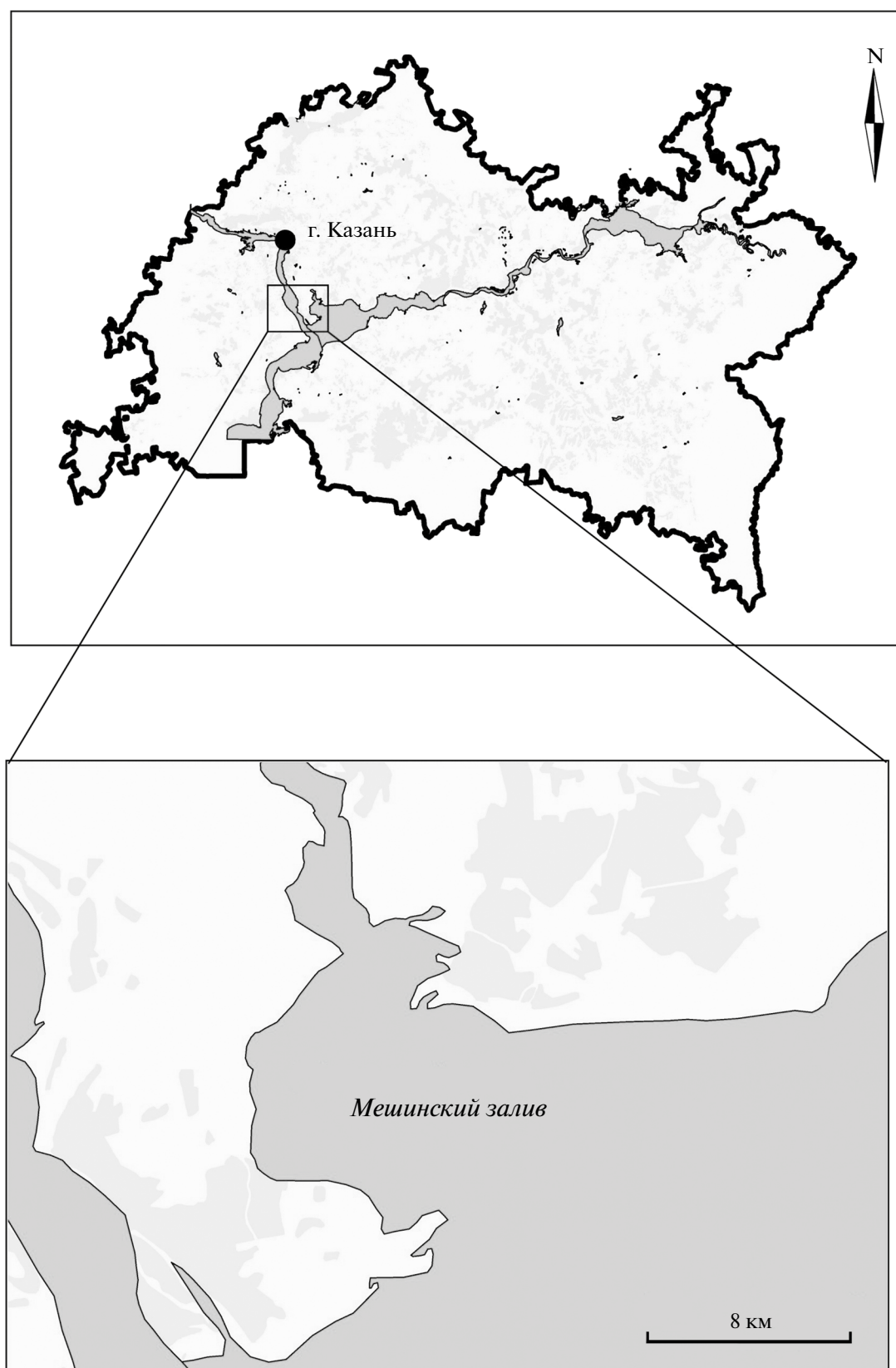


Рис. 1. Карта-схема района исследования.

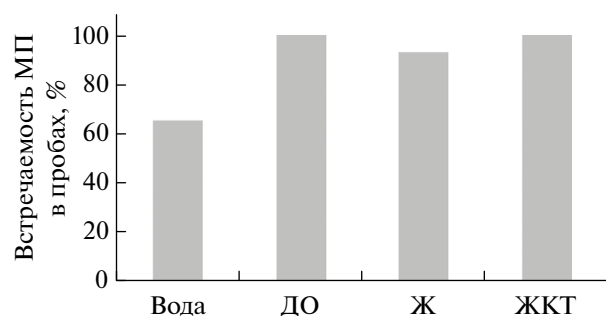


Рис. 2. Частота встречаемости частиц МП в пробах воды, ДО, жабрах (Ж) и ЖКТ рыб.

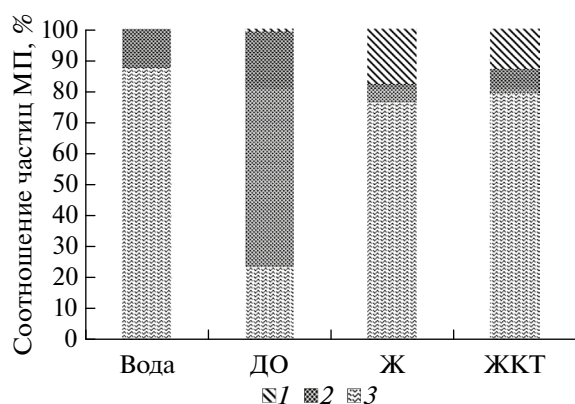


Рис. 3. Процентное соотношение различных форм частиц МП в пробах воды, ДО, Ж и ЖКТ рыб. 1 — пленка, 2 — фрагмент, 3 — нить.

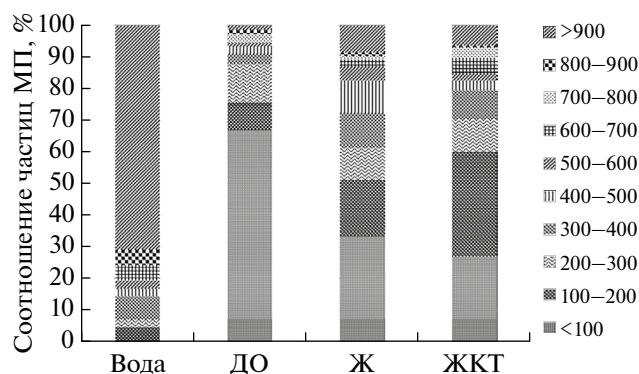


Рис. 4. Процентное соотношение частиц МП по длине (мкм) в пробах воды, ДО, жабрах Ж и ЖКТ рыб.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции (для $p < 0.05$, критерий Спирмена) зависимостей между длиной, массой рыбы и числом МП в жабрах и ЖКТ

Показатель	L	M
$N_{\text{ж}}$	–0.76	–0.86
$N_{\text{жкт}}$	–0.63	–0.63

Примечание. L — длина рыбы, см; M — масса, г; $N_{\text{ж}}$ — число МП в жабрах, $N_{\text{жкт}}$ — число МП в желудочно-кишечном тракте.

меры которых относились, в основном, к диапазону <100 мкм. В жабрах и ЖКТ рыб идентифицированы в основном мелкие частицы размером <200 мкм с преобладанием нитей.

Количество обнаруженных частиц МП в жабрах и ЖКТ отразилось на биологических показателях исследованных рыб. Корреляционный анализ показал обратную зависимость между количеством частиц МП в жабрах/ЖКТ и длиной/массой рыбы (табл. 2).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для выявления вероятных источников поступления МП в Мешинский залив Куйбышевского водохранилища проведен анализ содержания частиц в воде и органах рыб в сезонном аспекте. Количество частиц МП в воде весной (май) в пересчете на кубический метр достигало 12 ед., осенью (сентябрь) — 29 ед. (рис. 5). Это косвенно указывает, что поверхностный сток не является главным источником поступления МП в воду. Сброс коммунальных сточных вод, активная антропогенная деятельность в навигационный и рекреационный периоды приводят к поступлению в воду мезо- и микропластика, скоплению пластиковых отходов в прибрежной зоне, которые подвергаются деградации под воздействием физико-химических процессов, что подтверждается увеличением содержания МП в осенних пробах воды.

Осенью содержание МП в жабрах и ЖКТ рыб уменьшилось по сравнению с весной. Такое несоответствие с количеством МП в воде, по-видимому, связано с особенностями пищевого поведения рыб в условиях различного уровня пищевых ресурсов весной и осенью.

Лещ относится к бентофагам, в связи с этим возможные пути поступления МП в организм из воды через жабры в процессе дыхания и питания (когда рыба принимает МП за корм), а также из ДО при взмучивании грунта в процессе поиска и заглатывания бентосных организмов. На жабрах и в ЖКТ были обнаружены, главным образом, нити (рис. 3), что указывает на преимущественный путь поступления МП в организм через воду. Однако в жабрах и ЖКТ рыб фрагменты и особенно пленки идентифицировали значительно чаще по сравнению со средой обитания (водой и ДО).

Большее разнообразие частиц МП в жабрах и ЖКТ рыб наблюдали осенью, когда были выявлены все виды МП при преобладании нитей (рис. 6). Весной в ЖКТ рыб встречались, главным образом, фрагменты и нити примерно в равных соотношениях, что, по-видимому, обусловлено сезонными предпочтениями в рационе питания. Сезонная вариативность диеты была отмечена и для других видов рыб (Березина и др., 2021).

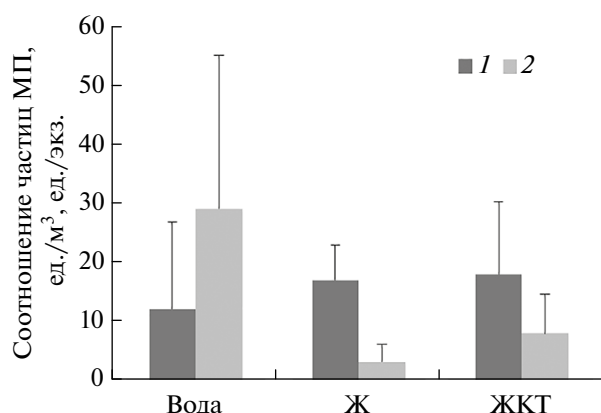


Рис. 5. Сезонное содержание МП в пробах воды (ед./м³), жабрах Ж и ЖКТ рыб (ед./экз.). 1 – весна, 2 – осень.

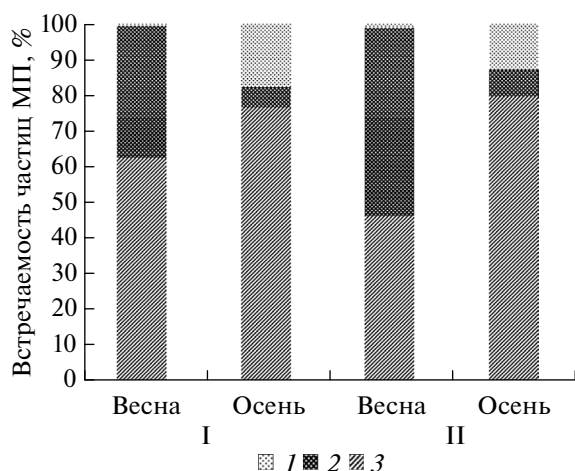


Рис. 6. Сезонное распределение встречаемости частиц МП по форме в Ж (I) и ЖКТ (II) рыб. 1 – плёнка, 2 – фрагмент, 3 – нить.

По данным (Bhuyan, 2022), накопление МП в ЖКТ причиняет рыбе физический вред: происходит закупорка и анатомические повреждения ЖКТ, снижение аппетита. В исследованиях воздействия МП на рыбах группы орязий (*Oryzias melastigma* McClelland, 1839) также наблюдали торможение роста, дисбактериоз кишечника рыбы, снижение массы тела, нарушение антиоксидантного состояния печени, повреждение репродуктивных органов.

Влияние МП на массу и длину рыб также может быть связано с токсическим эффектом. Мелкие частицы МП представляют опасность в силу наличия адсорбционных свойств, в результате чего на их поверхности концентрируются стойкие токсиканты (Kirstein et al., 2016). Полициклические ароматические углеводороды и полихлорированные дифенилы, а также тяжелые металлы (свинец, никель, кадмий и цинк) были обнаруже-

ны на частицах МП, извлеченных из различных сред (Kirstein et al., 2016). Отмечено также негативное воздействие на иммунную систему. МП работает как переносчик, доставляя патогенные микроорганизмы в ткани-мишени, вызывая воспалительные процессы (Kirstein et al., 2016).

Если сравнивать полученные данные по содержанию МП в абиотических компонентах исследованного района с литературными, можно сделать вывод, что они соответствуют низкому уровню. Анализ проб воды из 168 рек по всему миру показал, что содержание МП в воде достигает в среднем 11 128 ед./м³, в донных отложениях из 96 рек – в среднем 1161 ед./кг (Gallitelli et al., 2020; Cera et al., 2020). Однако загрязнение рек в зависимости от места отбора проб варьирует от значений, близких к нулю, до тысяч единиц на единицу массы или объема (Gallitelli et al., 2020; Cera et al., 2020). Например, в воде р. Миньон, Италия, разброс содержания МП был 40–1170 ед./м³, в ДО 0.3–2.5 ед./кг (Gallitelli et al., 2020). Содержание МП в ДО в значительной степени зависит от гидрологических характеристик реки и механического состава грунта. Река Меша характеризуется средней водностью, ее притоки зарегулированы прудами, средний многолетний годовой расход воды составляет 17.4 м³/с (Водные..., 2006), грунт в местах отбора илисто-глинистый, что способствует накоплению МП, однако полученные нами данные по содержанию МП в ДО р. Меша на уровне 44.7 ± 41.8 ед./кг позволяют охарактеризовать уровень загрязнения донного грунта как низкий.

Содержание МП в рыбе также имеет значительный разброс в водных объектах. Например, в промысловой рыбе северо-восточной части Атлантического океана частота встречаемости МП для 150 проб трех видов рыб достигала 48 и 30%, со средними значениями 1.2 ± 2.0 и 0.7 ± 1.2 ед./экз. в ЖКТ и жабрах соответственно (Barboza et al., 2020).

Исследования, проведенные у берегов Австралии и островов Фиджи (Wootton et al., 2021), показали, что частота встречаемости МП в ЖКТ рыбы была на уровне 61.6 и 35.3% со средними значениями 1.58 ± 0.23 и 0.86 ± 0.14 ед./экз. для изученных районов Австралии и островов Фиджи соответственно.

Степень загрязнения рыбы МП зависит не только от типа водного объекта (океан, море, река, озеро) и его гидрологического режима, но и типа питания рыбы (Березина и др., 2021). На доступность МП для рыб влияет множество факторов. Считается, что рыбы–планктофаги и рыбы–бентофаги более уязвимы к попаданию МП в организм, чем рыбы–хищники, из-за их неселективного пищевого поведения (Wesch et al., 2016; Lusher et al., 2017). По данным (Mizraji et al., 2017), всеядные рыбы поглощают больше МП, чем растительноядные и плотоядные рыбы.

Результаты нашего исследования показали, что встречаемость МП в рыбе Мешинского залива значительно выше по сравнению с литературными данными как в процентном выражении встречаемости в пробах рыбы, так и по количеству МП на экземпляре (табл. 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование выявило невысокий уровень загрязнения по частоте встречаемости и содержанию МП в воде и ДО устьевой части р. Меша по сравнению с реками и озерами различных стран мира. В пробах воды преобладали нити, в ДО – фрагменты; содержание МП в осенних пробах было выше по сравнению с весенними. По частоте встречаемости и содержанию МП в жабрах и ЖКТ леща *Abramis brama* загрязнение рыбы относится к высокому уровню по сравнению с литературными данными, что связано с особенностями пищевого поведения исследованного вида рыбы. В жабрах преобладали нити, в ЖКТ – в основном нити, а также фрагменты в весенних пробах. Корреляционный анализ показал, что содержание МП в жабрах и ЖКТ негативно влияет на биологические показатели рыбы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю признательность сотрудникам Татарского филиала Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии за рыбу, предоставленную для анализа.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2024-0004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Водные объекты Республики Татарстан // Географический справочник. 2006. Казань: Изд-во "Идел-пресс".
- Березина Н.А., Литвинчук Л.Ф., Максимов А.А. 2021. Связь пищевого спектра рыб с составом зоопланктона и зообентоса в субарктическом озере // Биология внутр. вод. № 4. С. 406. <https://doi.org/10.31857/S0320965221040069>
- Зобков М.Б., Есюкова Е.Е. 2017. Микропластик в морской среде: обзор методов отбора, подготовки и анализа проб воды, донных отложений и береговых наносов // Океанология. Т. 58. № 1. С. 149.
- Никитин О.В., Латыпова В.З., Миннегулова Л.М. и др. 2019. Загрязнение пресных вод микропластиком: необходимость мониторинга и контроля // Химия и инженерная экология: Сб. тр. Междунар. науч. конф., 26–28 сентября 2019 г. Казань: Изд-во ИП Сагиева А.Р. С. 154.
- Северов Ю.А., Кузнецов В.А., Шакирова Ф.М. и др. 2018. Оценка численности ранней молоди рыб на прибрежных нерестилищах Мешинского залива Куйбышевского водохранилища // Вестн. Астрахан. гос.-техн. ун-та. Серия: рыбное хозяйство. № 2. С. 33. <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2018-2-33-40>
- Структура островных экосистем Куйбышевского водохранилища. 1980. М.: Наука.
- 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. e134625. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134625>
- Bhuyan M.S. 2022. Effects of microplastics on fish and in human health // Front. Environ. Sci. V. 10. 827289?. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.827289>
- Cera A., Cesarini G., Scalicia M. 2020. Microplastics in freshwater: what are the news from the world? // Diversity. V. 12. P. 276. <https://doi.org/10.3390/d12070276>
- Gallitelli L., Cesarini G., Cera A. et al. 2020. Transport and deposition of microplastics and mesoplastics along the river course: a case study of a small river in central Italy // Hydrology. V. 7. P. 90. <https://doi.org/10.3390/hydrology7040090>
- Kirstein I.V., Kirmizi S., Wichels A. et al. 2016. Dangerous Hitchhikers? Evidence for potentially pathogenic *Vibrio* spp. on microplastic particles // Mar. Environ. Res. V. 120. P. 1. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2016.07.004>
- Lusher A.L., Welden N.A., Sobral P. et al. 2017. Sampling, isolating and identifying microplastics ingested by fish and invertebrates // Anal. Methods. V. 9. P. 1346. <https://doi.org/10.1039/C6AY02415G>
- Ma J., Niu X., Zhang D. et al. 2020. High levels of microplastic pollution in aquaculture water of fish ponds in the Pearl River Estuary of Guangzhou, China // Sci. Total Environ. V. 744. P. 140679. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140679>
- Mizraji R., Ahrendt C., Perez-Venegas D. et al. 2017. Is the feeding type related with the content of MPs in intertidal fish gut? // Mar. Pollut. Bull. V. 116. № 1–2. P. 498. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.008>
- Mukhanov V.S. 2019. A new method for analyzing microplastic particle size distribution in marine environmental samples // Ecologica Montenegrina. V. 23. P. 77. <https://doi.org/10.37828/em.2019.23.10>
- Santana M.F., Dawson A.L., Motti C.A. et al. 2021. Ingestion and depuration of MPs by a planktivorous coral reef fish, *Pomacentrus amboinensis* // Front. Environ. Sci. V. 9. P. 79. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.641135>
- Sutherland W. J., Broad S., Caine J. et al. 2016. A horizon scan of global conservation issues for 2016 // Trends Ecol. Evol. V. 31(1). P. 44. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.11.007>

Wesch C., Bredimus K., Paulus M. et al. 2016. Towards the suitable monitoring of ingestion of mps by marine biota: a review // Environ. Pollut. V. 218. P. 1200. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.076>

Wootton N., Ferreira M., Reis-Santos P. et al. 2021. A comparison of microplastic in fish from Australia and Fiji // Front. Mar. Sci. V. 8. P. 690991. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.690991>

Microplastic in Abiotic and Biotic Parts of the Mesha Bay of the Kuibyshev Reservoir (Republic of Tatarstan)

N. Y. Stepanova^{1,*}, K. A. Shevchuk¹, L. S. Kuzmin¹, A. R. Gaisin¹

¹Kazan Federal University, Kazan, Russia

*e-mail: step090660@yandex.ru

The study of microplastic content in water, sediments, gills and gastrointestinal tract of bream (*Abramis brama*) at the mouth of the Mesha River, the right tributary of the Kama River, was conducted. The content of microplastics in water was found at the level of 20.5 ± 22.3 units/m³, in bottom sediments 44.7 ± 41.8 units/kg, in fish gills 12.3 ± 8.4 units/example, in the gastrointestinal tract 14.5 ± 11.5 units/example. Fibers dominated in water samples, in the gills and gastrointestinal tract of fish, fragments dominated in the sediment. Correlation analysis showed the presence of a negative relationship between the content of microplastics in the gills, gastrointestinal tract and biologic indicators of studied fish. In terms of the frequency of occurrence and content of microplastics in the gills and gastrointestinal tract, the contamination of the studied fish is at a high level compared to literature data, which is associated with the feeding behavior of bream.

Keywords: microplastic, water, bottom sediments, bream *Abramis brama*, Kuibyshev Reservoir