

**ПОТРЕБЛЕНИЕ МИКРОПЛАСТИКА
ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА МОЛОДЬЮ
ЛОСОСЕВЫХ РЫБ *ONCORHYNCHUS (PARASALMO)*
MYKISS В ИСКУССТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ**

© 2025 г. И.В. Седлецкий (spin: 6788-5926), В.А. Беляев (spin: 7717-0509)

ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО», Россия, Москва, 105187

Email: sedletskiy@vniro.ru

Поступила в редакцию 13.10.2025 г.

В ходе лабораторных исследований было изучено воздействие микропластика из полимера полиэтилентерефталат (МП) на молодь микижи *Oncorhynchus (Parasalmo) mykiss* в водной среде. Тридцать экземпляров были случайным образом распределены по трём аквариумам: один служил контрольным, а в водную среду двух других добавляли различное количество частиц МП. Экспозиция составила 30 дней. Результаты исследования их желудочно-кишечных трактов (ЖКТ) в конце эксперимента показали, что молодь поглощала его как из воды, так и со дна аквариума. МП обнаруживался в ЖКТ в количестве до 460 частиц/экз. Микижа из контрольной группы, где не было микропластика в воде, росла лучше, чем та, что подвергалась воздействию МП путём заглатывания. Оценена связь между ростом рыбы (длиной и массой) и наличием микропластика.

Ключевые слова: микропластик, полиэтилентерефталат, желудочно-кишечный тракт, *Oncorhynchus (Parasalmo) mykiss*.

ВВЕДЕНИЕ

Промысловые виды рыб подвергаются воздействию множества антропогенных факторов, включая чрезмерный вылов, деградацию местообитаний и загрязнение окружающей среды. В условиях растущего потребления морепродуктов, добавление еще одного фактора – накопления МП в водных экосистемах стало актуальной проблемой, представляющей угрозу как для биоресурсов, так и для их среды обитания (Wootton et al., 2021).

Изучение трофической структуры рыбных сообществ было и остаётся чрезвычайно важным для понимания их функционирования (Беляев, 2003). Если говорить о влиянии на них полимеров и других новейших загрязнителей, то исследования последних десятилетий в основном сосредоточены на обнаружении МП в водной среде и различных видах рыб, обитающих в естественных условиях (Беляев и др., 2024; Anbumani, Kakkar,

2018; Souza et. al., 2024). Лабораторные эксперименты зарубежных учёных показали, что МП могут оказывать как прямое, так и косвенное негативное воздействие на биологические процессы рыб, включая физический вред, нарушения липидного обмена, изменения в поведении и цитотоксичность (Collard et al., 2019; Zhang et al., 2019).

Микропластики попадают в организм рыб двумя основными путями: непосредственно из окружающей среды и через трофические цепи. Рыбы могут намеренно или случайно заглатывать МП, принимая их за естественную пищу, такую как планктон, сопоставимый по размеру с микропластиками.

Несмотря на увеличение числа исследований по влиянию МП на промысловых рыб, в литературе отмечается недостаток контролируемых экспериментов (Markic et al., 2019), особенно в нашей стране, где подобные иссле-

дования, за исключением единичных работ на личинках рыб (Frank et al., 2023), лабораторные исследования на промысловых видах практически не проводились.

Микижа (*Oncorhynchus (Parasalmo) mykiss*) является объектом промыслового и спортивного рыболовства на Дальнем Востоке России, в Северной Америке и других регионах, что делает её изучение актуальным. Ранее исследования воздействия МП на микижу в основном фокусировались на миграции микро- и нанопластиков в организме и барьерной функции кишечника после воздействия полистирольных МП (Kim et al., 2020; Aşmonaitė et al., 2018).

В естественных условиях концентрации МП могут варьироваться в зависимости от географических и экологических факторов (Колончин и др., 2023; Collard et al., 2019), что затрудняет их системное изучение *in situ*.

В связи с этим авторы исследования организовали лабораторные эксперименты, моделирующие воздействие различных концентраций частиц МП на возможное заглатывание и накопление микропластика в организме микижи.

Целью данного исследования являлась оценка зависимости между концентрацией МП в водной среде и его накоплением в организме микижи, как одного из видов лососевых рыб, в лабораторных условиях.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

В качестве экспериментального объекта была выбрана микижа (радужная форель), которая в молодом возрасте питается бентосом (Савваитова и др., 1973) и зоопланктоном. В море рацион у данного вида включает *Calanus finmarchicus* (длина 2–4 мм) и ювенильные формы *Euphausia pacificus* (4–5 мм) и более мелкие организмы, размеры которых сопоставимы с МП (до 5 мм).

Для тестирования влияния МП был использован полимер полиэтилентерефталат (ПЭТ), широко применяемый в производстве пластиковой тары и часто обнаруживаемый в

морских и пресноводных экосистемах. В пресноводных водоёмах, согласно исследованию (Naidoo, Glassom, 2019), полипропилен и ПЭТ являются доминирующими полимерами в желудочно-кишечном тракте, жабрах и мышцах аквакультурных рыб.

Согласно классификации Д. Литнер (Lithner et al., 2011), ПЭТ относится ко II классу опасности для водной среды, что означает его относительную безопасность для экосистем, но потенциальную угрозу при заглатывании живыми организмами. Первичное сырьё для эксперимента представляло собой гранулы размером 4–6 мм, которые были измельчены компактной электромельницей до фракции от 0,4 до 1,4 мм (рис. 1). Были подготовлены растворы с двумя концентрациями



Рис. 1. Микропластик полиэтилентерефталат после измельчения на предметном столе бинокля.



Рис. 2. Гранулы микропластика ПЭТ, после обработки пробы ЖКТ едким калием и фильтрации на целлюлозный фильтр.



Рис. 3. 100 л аквариумы, которые использовались для контроля и двух серий эксперимента на молоди микижи. Внизу на полу располагались внешние фильтры – по одному на каждую ёмкость, к ним ведут шланги водозабора и возврата воды от трубок в аквариумах.

МП: 1 г ПЭТ на 100 л воды (примерно 2 млн частиц МП, 10 мг/л) и 5 г ПЭТ на 100 л (около 10 млн частиц МП, 50 мг/л). В контрольной группе МП не добавлялся. Ежедневно осуществлялась 10% подмена воды, при которой добавлялось соответствующее количество раствора с МП для поддержания его концентрации.

Эксперимент проводился в трёх 100-литровых аквариумах (40 × 30 × 45 см), в которых содержались по 10 экз. рыб в каждом аквариуме (рис. 3). Средняя длина и масса рыб составляли $7,31 \pm 1,2$ см и $41,26 \pm 20,13$ г соответственно. Период акклиматизации рыб к условиям аквариумов составил 7 дней. Вода в аквариумах охлаждалась до 15–17°C с помощью внешней холодильной установки и поддерживалась в стабильном состоянии с использованием аэрации и внешних фильтров

фирмы «Tetra» (рис. 4). Ежедневно измерялись физико-химические параметры воды: электропроводность (270–290 мкСм), pH (7,2–7,7), kH (4–5) и dGH (8–10). Аквариумы не имели искусственного освещения и освещались имеющимся в лаборатории потолочным светом. Для кормления рыб использовался коммерческий корм для форели производства ФГБНУ «ВНИРО» фракции 1,4–1,8 мм в количестве 1% от массы тела ежедневно. Ежедневно в течение 30–40 мин проводился визуальный осмотр рыб. Каждые 1–2 дня осуществлялась 10% подмена воды с добавлением свежей воды.

Экстракция МП из ЖКТ проводилась согласно методике Э. Люшер (Lusher, Hernandez-Milian, 2018). Согласно этому протоколу пробы ЖКТ рыб обрабатывались 10% раствором КОН и инкубировались в термос-



Рис. 4. Аквариум, его внутреннее оборудование и экспериментальные рыбы: у задней стенки видна трубка холодильной установки, слева шланги и распылители аэратора, справа водозаборная трубка с предохранительной губкой от засасывания рыб.

тате при 60 °С в течение 48–96 ч. Надосадочные жидкости пропускались через фильтровальную бумагу, которая затем высушивалась при комнатной температуре и анализировалась (рис. 2). Фильтровальная бумага исследовалась с помощью стереомикроскопа («Olympus», Япония) с увеличением 10×, 20× и 30×.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

У рыб контрольной и двух экспериментальных групп были измерены начальная и конечная массы тела. Результаты изменения

(прироста) зоологической длины и массы показали, что чем выше содержание МП в воде, тем меньше тенденция к увеличению веса и длины у этих рыб.

Было обнаружено, что общее количество потребления микижей МП в аквариумах с добавленным в ходе эксперимента МП, увеличивается с повышением его концентрации в водной среде (см. таблицу). Динамика роста и веса рыб в водоёмах с МП была ниже, чем в контрольном водоёме и у рыб живущих в среде без МП. Это согласуется с исследова-

Таблица. Росто-весовые показатели рыб и накопление МП из водной среды за 30 дней эксперимента

№ п/п	Группа рыб	Число особей	МП в среде, млн. шт.	Показатели	Начало эксп-та	Окончание эксп-та	Число МП шт./рыбе		
					1-й день	30-й день	мин.	макс.	Ср./ош.
1	Контрольная	10	0	Зоол. длина, см	9.7±0.18	10.9±0.34	0	0	0
				Вес рыбы, г	10,4±0.52	14,4±1.08			
2	Экспериментальная №1	10	2	Зоол. длина, см	10.7±0.19	10.9±0.34	9	292	130.9±21.27
				Вес рыбы, г	14,3±0.56	14,4±1.08			
3	Экспериментальная №2	10	10	Зоол. длина, см	10.4±0.22	10.9±0.34	51	460	217.1±25.41
				Вес рыбы, г	12,9±0.44	14,4±1.08			

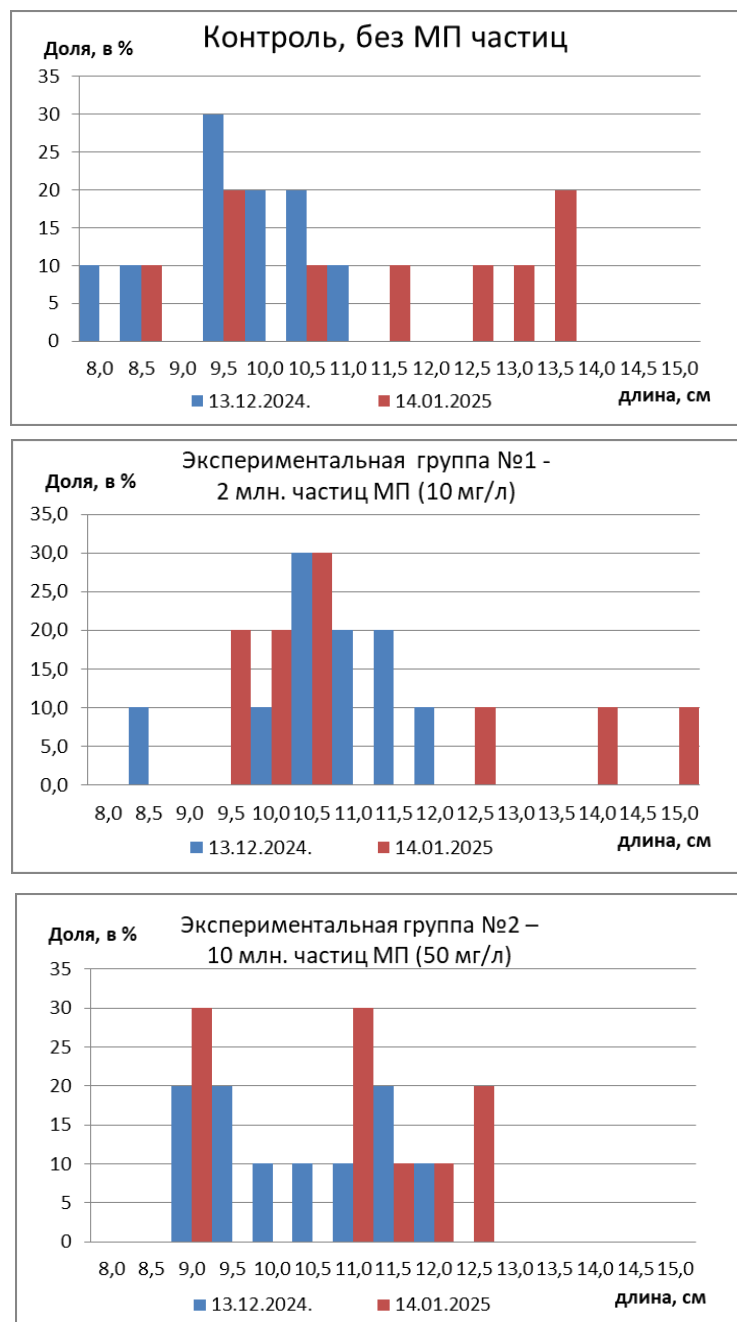


Рис. 5. Сравнительные диаграммы распределения роста рыб в контроле и экспериментах с разной концентрацией МП.

ниями других авторов на молоди рыб других семейств (Naidoo, Glassom, 2019). Основываясь на этом результате, нами было установлено, что МП попадал в организм всех особей микижи, находившихся в экспериментальных аквариумах, где вносился МП.

Оценка методами описательной статистики и Т-тестом показателей роста для

микижи с воздействием концентраций МП, не установила достоверной зависимости между средней длиной, массой и воздействием МП в 30-дневный период проведения эксперимента (рис. 5). Большой разброс значений зоологической длины рыб в начале и в конце эксперимента показал, что подростки микижи подвержены дифференциации по скорости

роста. Возможные причины могут носить поведенческий характер – более крупные особи ведут себя более агрессивно по отношению к конспецифичным особям и поедают корм активнее тех рыб, что меньше по размеру.

Результаты показали, что проникновение многочисленных частиц МП в организм микижи произошло из водной среды и при их лабораторном содержании. Повышенные и различающиеся концентрации дополнительно добавленного МП привело к различному уровню накопления МП у рыб в экспериментальных аквариумах с МП-экспозицией. Наибольшее количество МП было обнаружено в ЖКТ рыб экспериментальных резервуаров. Визуально было замечено, что микижа в большинстве случаев отказывалась заглатывать/потреблять плавающий пластик, добавленный извне, что, было похоже на картину, описанную другими исследователями. Однако, было отмечено, что отдельные особи иногда намеренно или случайно пережевывали МП во время кормления. Через несколько секунд они выплевывали частицы МП изо рта.

Намеренное заглатывание твердых пластиковых частиц рыбами по мнению И. Мухиба и М. Рахмана (Muhib, Rahman 2024) возможно и встречается редко, но, как показал наш опыт, такое заглатывание происходит. Это доказывает, обнаруженное нами, наличие большого числа частиц МП в ЖКТ. Результаты эксперимента указывают на то, что основная доля МП, потребляемая подопытными рыбами, может быть связана с питанием: непреднамеренным заглатыванием частиц МП и/или непреднамеренным поглощением МП во время питания рыб.

С точки зрения дальнейшей перспективы, представляет интерес комплексная оценка рыб (загрязнённость ЖКТ и других внутренних органов рыб, крови и комплекса физиологических показателей состояния), которые находятся под воздействием частиц МП как в природных, так экспериментальных условиях. Подобные исследования в части метабо-

ломики оценки состояния рыб под воздействием микропластика уже начаты авторами этих материалов и их коллегами (Abramova et al., 2025).

ВЫВОДЫ

Для того чтобы лучше понять, как лососевые рыбы поглощают МП в своей среде обитания, проведён контролируемый эксперимент, в ходе чего рыбы подвергались воздействию различных и достаточно высоких концентраций частиц МП при параллельном питании кормом не содержащем МП.

Исследование этого вида лососевых рыб показало, что: 1) чем выше содержание МП в воде, тем меньше тенденция к увеличению веса и длины у этих рыб; 2) общее количество потребления микижей МП в аквариумах с добавленным в ходе эксперимента, МП нелинейно увеличивается с увеличением концентрации МП в аквариумах с рыбой; 3) МП попадал в организм всех особей микижи, находившихся в экспериментальных аквариумах с МП-экспозицией.

Данное исследование демонстрирует необходимость дальнейшего изучения воздействия полимеров и их МП-формы разной степени токсичности на водно-биологические ресурсы. Такого рода эксперименты могут служить моделью для будущих исследований контролируемого воздействия микропластика на промысловые и другие виды рыб.

Благодарности

Авторы выражают свою благодарность А.В. Мышкину и Ю.А. Новоселовой (ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО», филиал ВНИИПРХ) за предоставленных для эксперимента рыб, а также С.В. Камшукову, И.В. Бурлаченко, Н.С. Мюге (Центральный институт «ВНИРО») за содействие в организации эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Беляев В.А. Экосистема зоны течения Куросио и её динамика. Хабаровск: Хабаров. книжн. изд-во, 2003. 382 с.

- Беляев В.А., Седлецкий И.В., Педченко А.П. Влияние загрязнения морской среды микропластиком на рыбные ресурсы и аспекты продовольственной безопасности. Часть 1. // Исп. и охр. природн. ресурс. России. 2024. № 3 (179). С. 35–40.
- Колончин К.В., Педченко А.П., Беляев В.А. Исследования содержания микропластика в воде и промысловых рыбах: от научного поиска к масштабному мониторингу // Тр. ВНИРО. 2023. Т. 193. С. 162–173.
- Савваитова, К.А., Максимов, В.А., Новиков, Г.Г. Камчатские благородные лососи: систематика, экология и перспективы использования. Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 1973. 119 с.
- Abramova L.S., Kozin A.V., Belyaev V.A., Sedletsky I.V. Metabolomics for assessing the condition of Whitefish fry under the influence of microplastics // Abstracts of The third International conference «Microplastics in Polymer Science», October 20-24, 2025, Samarkand, Uzbekistan (в печати).
- Anbumani S., Kakkar P. Ecotoxicological effects of microplastics on biota // A review. Environmental Science and Pollution Research, 2018. V. 25. № 15. P. 14373–14396.
- Ašmonaitė G., Sundh H., Asker N., Almroth B.C. Rainbow trout maintain intestinal transport and barrier functions following exposure to polystyrene microplastics, Environmental Science Technology. American Chemical Society, 2018. V. 52. № 24. P. 1–38.
- Collard F., Gasperi J., Gabrielsen G. W., Tassin B. Plastic Particle Ingestion by Wild Freshwater Fish: A Critical Review. Environmental Science and Pollution Research, 2019. V. 53. № 22. P. 12974–12988.
- Frank Y.A., Interesova E.A., Solovyev M.M., Xu J., Vorobiev D.S. Effect of Microplastics on the Activity of Digestive and Oxidative-Stress-Related Enzymes in Peled Whitefish (*Coregonus peled* Gmelin) Larvae // Internat. J. Mol. Sci. 2023. V. 24. № 13. P. 1–16.
- Kim J., Poirier D.G., Helm P.A., Bayoumi M., Rochman C.M. No evidence of spherical microplastics (10–300 µm) translocation in adult rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) after a two-week dietary exposure // PLoS ONE. 2020. V. 15. № 9. P. 1–11.
- Lithner D., Larsson Å., Dave G. Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition // Sci. Total Environ. 2011. V. 409. № 18. P. 3309–3324.
- Lusher A.L., Hernandez-Milian G. Microplastic Extraction from Marine Vertebrate Digestive Tracts, Regurgitates and Scats: A Protocol for Researchers from All Experience Levels // Bio-Protocol. 2018. V. 8. №. 22. P. 1–11.
- Markic A., Gaertner J.-C., Gaertner-Mazouni N., Koelmans A.A. Plastic ingestion by marine fish in the wild // Crit. Rev. Environ. Sci. Technol. 2019. V. 50. P. 657–697.
- Muhib I., Rahman M. How do fish consume microplastics? An experimental study on accumulation pattern using Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) // Env. Sci. Pollut. Res. 2024. V. 31. P. 39303–39317.
- Naidoo T., Glassom D. Decreased growth and survival in small juvenile fish after chronic exposure to environmentally relevant concentrations of microplastic // Mar. Poll. Bull. 2019. V. 145. P. 254–259.
- Souza J.S.; de Pinho J.V.; de Almeida Rodrigues P. et al. A Systematic Review of Microplastic Contamination in Commercially Important Bony Fish and Its Implications for Health // Environments, 2024. V. 11. P. 174.
- Zhang F., Wang X., Xu J. et al. Food-web transfer of microplastics between wild caught fish and crustaceans in East China Sea // Mar. Poll. Bull. 2019. V. 146. P. 173–182.
- Wootton N., Reis-Santos P., Gillanders B.M. Microplastic in fish – A Global Synthesis // Rev. Fish. Biol. Fisheries. 2021. V. 31. P. 753–771.

**CONSUMPTION OF MICROPLASTIC POLYETHYLENE
TEREPHTHALATE BY JUVENILE SALMON
ONCORHYNCHUS (PARASALMO) MYKISS
UNDER ARTIFICIAL CONDITIONS**

© 2025 г. I.V. Sedletsky, V.A. Belyaev

*State Scientific Center of the Russian Federation «VNIRO»,
Russia, Moscow, 105187*

In the course of laboratory studies, the effect of microplastics made of polyethylene terephthalate (MP) polymer on juvenile of Kamchatka steelhead *Oncorhynchus (Parasalmo) mykiss* in an aquatic environment was studied. Thirty specimens were randomly distributed across three aquariums: one served as a control tank, and varying amounts of MP particles were added to the aquatic environment of the other two. The exposition lasted 30 days. The results of the study of their gastrointestinal tract (GIT) at the end of the experiment showed that the juveniles absorbed it both from the water and from the bottom of the aquarium. MP was detected in the gastrointestinal tract in the amount of up to 460 particles/specimen. Fishes from the control group, where there were no microplastics in the water, grew better than the one that was exposed to MP by ingestion. The relationship between fish growth (length and weight) and microplastic consumption is estimated and discussed.

Keywords: microplastics, polyethylene terephthalate, gastrointestinal tract, *Oncorhynchus (Parasalmo) mykiss*.