Научные труды Дальрыбвтуза. 2026. Том 76, № 2. С. 124–130.

Научная статья
УДК 504.054 DOI: doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2026-76-13 EDN: QEKYUC

Закономерности биоаккумуляции микропластика фильтрующими гидробионтами на примере *Unio pictorum* в озере Вельё национального парка «Валдайский»

Злата Геннадьевна Каурова [1], Ульяна Романовна Сычёва [2]
Санкт-Петербургский государственный университет ветеринарной медицины, Санкт-Петербург, Россия
[1] 6zlata@mail.ru
[2] ul_sycheva@mail.ru

Аннотация. Загрязнение пресноводных экосистем микропластиком представляет угрозу для биоты и требует разработки эффективных методов биоиндикации. Двустворчатые моллюски-фильтраторы, в частности перловица обыкновенная (*Unio pictorum*), рассматриваются как перспективные объекты для оценки селективности накопления частиц разной морфологии. Цель работы – определение селективности биоаккумуляции микропластика различных морфотипов *U. Pictorum* путем сравнительного анализа коэффициентов обогащения. Исследование проведено в 2025 г. на акватории озера Вельё (национальный парк «Валдайский»), испытывающего низкую антропогенную нагрузку. Проанализированы пробы воды (планктонная сеть Джеди) и 20 особей моллюсков. Выделение микропластика осуществляли методом фильтрации с последующей микроскопией, идентификацию проводили с соблюдением протоколов контроля контаминации. Установлено доминирование нитевидных частиц как в воде (71,6 %), так и в организме моллюсков (63,4 %). Цветовое распределение (преобладание черных, красных и синих волокон) указывает на антропогенные источники поступления (износ текстиля, деструкция упаковки и рыболовных снастей). На основе расчета коэффициентов обогащения (EF) выявлена селективность аккумуляции: максимальные значения отмечены для фрагментов (EF=1,06), тогда как для нитей (EF=0,62) и плёнок (EF=0,28) они ниже. Показана зависимость удержания нитей от их длины: доля волокон ≥1,5 мм в моллюсках составляет лишь 32,2 %. Высокая корреляция цветового распределения нитей в воде и моллюсках ($r=0,97$; $p<0,05$) подтверждает репрезентативность *U. pictorum* как биоиндикатора. Полученные данные имеют значение для оценки трофического переноса микропластика, экологических рисков и гигиенической безопасности продукции пресноводного промысла. Вид может быть рекомендован для программ экологического мониторинга.

Ключевые слова: микропластик, перловица обыкновенная, *Unio pictorum*, биоаккумуляция, коэффициент обогащения, селективное накопление, пресноводные экосистемы, биоиндикация

Благодарности: выражаем особую благодарность национальному парку «Валдайский» за предоставление площадки и содействия в исследованиях.

Для цитирования: Каурова З. Г., Сычёва У. Р. Закономерности биоаккумуляции микропластика фильтрующими гидробионтами на примере *Unio pictorum* в озере Вельё национального парка «Валдайский» // Научные труды Дальрыбвтуза. 2026. Т. 76, № 2. С. 124–130.

© Каурова З. Г., Сычёва У. Р., 2026

Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University. 2026. Vol. 76, no. 2. P. 124–130.

FISHERIES, AQUACULTURE AND INDUSTRIAL FISHERIES

Original article

Patterns of microplastic bioaccumulation by filtering hydrobionts using the example of *Unio pictorum* in Lake Velje, Valdaysky National Park

Zlata G. Kaurova[1], Ulyana R. Sycheva[2]

Saint Petersburg State University of Veterinary Medicine, Saint Petersburg, Russia

[1] 6zlata@mail.ru

[2] ul_sycheva@mail.ru

Abstract. Microplastic pollution of freshwater ecosystems poses a threat to biota and requires the development of effective bioindication methods. Bivalve filter-feeders, particularly the painter's mussel (*Unio pictorum*), are considered promising objects for assessing the selectivity of particle accumulation of various morphologies. The aim of this work is to determine the selectivity of microplastic bioaccumulation of different morphotypes in *U. pictorum* through a comparative analysis of enrichment factors. The study was conducted in 2025 in the waters of Lake Velje (Valdaysky National Park), which experiences low anthropogenic pressure. Water samples (Jeddy plankton net) and 20 mussel specimens were analyzed. Microplastic extraction was performed by filtration followed by microscopy, with identification carried out in accordance with contamination control protocols. The dominance of filamentous particles was established both in water (71,6 %) and in mussel organisms (63,4 %). The color distribution (predominance of black, red and blue fibers) indicates anthropogenic sources of input (textile wear, degradation of packaging and fishing gear). Based on the calculation of enrichment factors (EF), accumulation selectivity was revealed: maximum values were observed for fragments (EF=1,06), while for fibers (EF=0,62) and films (EF=0,28) they were lower. A dependence of fiber retention on their length was shown: the proportion of fibers ≥1,5 mm in mussels is only 32,2 %. A high correlation of the color distribution of fibers in water and mussels ($r=0.97$; $p<0.05$) confirms the representativeness of *U. pictorum* as a bioindicator. The obtained data are important for assessing the trophic transfer of microplastics, environmental risks, and the hygienic safety of freshwater fishery products. The species can be recommended for environmental monitoring programs.

Keywords: microplastics, painter's mussel, *Unio pictorum*, bioaccumulation, enrichment factor, selective accumulation, freshwater ecosystems, bioindication

Acknowledgments: we express our special gratitude to the Valdaysky National Park for providing the study site and assistance in the research.

For citation: Kaurova Z. G., Sycheva U. R. Patterns of microplastic bioaccumulation by filtering hydrobionts using the example of *Unio pictorum* in Lake Velje, Valdaysky National Park. *Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University*. 2026; 76(2):124–130. (In Russ.).

Введение

Загрязнение водных экосистем микропластиком (МП) признано одной из серьезных экологических проблем современности, что обусловлено его устойчивостью к деградации, глобальной распространенностью и способностью служить вектором для транспорта по трофическим цепям токсичных соединений, включая полихлорированные бифенилы и тяжелые металлы [9, 10]. Основными источниками поступления синтетических частиц в водные объекты являются бытовые и промышленные стоки, износ автомобильных шин, а также деструкция полимерных материалов и текстиля в водной среде [5].

Особую озабоченность вызывает способность микропластика включаться в трофические цепи. Накопление частиц гидробионтами и их потенциальная миграция по пищевой сети требуют углубленного изучения для оценки рисков как для экосистем в целом, так и для здоровья

человека [10]. Механизмы негативного воздействия включают не только физические повреждения желудочно-кишечного тракта и провокацию воспалительных реакций у организмов, но и опосредованную токсичность за счёт десорбции загрязняющих веществ в желудочно-кишечном тракте после проглатывания [9, 10].

Накопление микропластика в гидробионтах в нынешнее время приобретает особую значимость для глобальной продовольственной безопасности из-за увеличивающейся доли продуктов пресноводного промысла и морепродуктов. Однако загрязнение всех водных экосистем миркопластиковыми частицами создаёт прямую угрозу риска переноса этих частиц по трофическим цепям в том числе и человеку. Несмотря на то, что прямая связь между потреблением микропластика и конкретными заболеваниями пока окончательно не установлена для человека, потенциальные риски включают в себя повреждение слизистых оболочек и тканей желудочно-кишечного тракта, иммунные и воспалительные реакции, опосредованную токсичность за счёт десорбции загрязняющих веществ (пестициды, тяжёлые металлы, т.п.) и патогенных микроорганизмов с поверхности микропластиковых частиц [3].

Среди гидробионтов пресноводных экосистем наиболее уязвимой группой с точки зрения продовольственной безопасности являются двустворчатые моллюски. В отличие от рыбы, которой обычно удаляют внутренности при промышленной обработке туши, моллюсков часто употребляют в пищу целиком, вместе с желудочно-кишечным трактом, фильтрующим аппаратом, где и может концентрироваться основная масса частиц. Таким образом, употреблённые в пищу моллюски могут быть источником поступления в организм человека микроплатика. В связи с этим изучение закономерностей накопления микропластика двустворчатыми моллюсками, включая и пресноводные виды, приобретает важное не только экологическое, но и гигиеническое значение для оценки реальных рисков здоровью населения.

Анализ современной литературы показывает, что количество исследований, посвященных накоплению микропластика пресноводными двустворчатыми моллюсками, остается ограниченным. К настоящему времени выполнено лишь 22 работы в данной области, при этом только четверть из них приходится на представителей семейства *Unionidae* [6]. Это подчеркивает актуальность исследований, направленных на изучение роли перловиц в процессах трансформации микропластикового загрязнения в пресноводных экосистемах.

Ранее европейскими исследователями была показана принципиальная возможность использования *Unio pictorum* для мониторинга микропластика в условиях антропогенной нагрузки, в частности в зонах влияния очистных сооружений [7]. Однако данные работы были сфокусированы преимущественно на констатации факта поглощения частиц микропластика и не затрагивали вопросы селективности их накопления в зависимости от их морфологии.

Перспективными объектами для такого мониторинга выступают двустворчатые моллюски-фильтраторы, в частности представители семейства *Unionidae*. Благодаря высокой фильтрационной активности и способности аккумулировать взвешенные вещества, они являются эффективными биоиндикаторами [8]. Важной физиологической особенностью унионид является способность к сортировке взвешенных частиц в мантийной полости с последующим выведением непригодного материала в составе псевдофекалий. Это позволяет предположить, что аккумуляция микропластика у них носит не пассивный, а избирательный характер, зависящий от морфологии и размера частиц. Современные исследования в области экотоксикологии микропластика выделяют в качестве одного из ключевых направлений изучение именно селективного питания двустворчатых моллюсков по отношению к частицам разной морфологии, поскольку избирательность накопления определяет дальнейшую судьбу микропластика в трофической сети.

В связи с этим актуальной задачей является разработка и применение методов биоиндикации для интегральной оценки загрязнения водных экосистем. Несмотря на наличие отдельных работ по аккумуляции микропластика двустворчатыми моллюсками, вопросы количественной оценки селективности этого процесса с применением специализированных индексов (коэффициентов обогащения) для пресноводных экосистем России остаются не разработан-

ными. Перспективными объектами для такого мониторинга выступают двустворчатые моллюски-фильтраторы, в частности, представители семейства *Unionidae*. Благодаря высокой фильтрационной активности и способности аккумулировать взвешенные частицы, они являются эффективными биоиндикаторами [8]. Перловица обыкновенная (*Unio pictorum*) – широко распространённый в пресноводных экосистемах Евразии вид, представляет собой релевантную модель для оценки нагрузки микропластиком в озёрных биоценозах. Настоящее исследование впервые для территории национального парка «Валдайский» реализует сравнительный анализ накопления разных морфотипов микропластика *U. pictorum* с расчетом коэффициентов, позволяющих дифференцировать избирательность аккумуляции.

Цель – определить селективность биоаккумуляции микропластика различных морфотипов двустворчатым моллюском перловицей обыкновенной (*Unio pictorum*) путём сравнительного анализа коэффициентов обогащения.

В начале исследования нами было выдвинуто предположение, что аккумуляция микропластика *U. pictorum* не является пропорциональной его содержанию в воде, а опосредована морфологическими характеристиками частиц (форма, размер), что выражается в различных значениях коэффициентов обогащения для разных морфотипов.

В процессе исследования были выполненные следующие **задачи**, поставленные относительно цели работы:

1. Провести сравнительный анализ морфометрических (форма, цвет) характеристик микропластика в воде озера Вельё и в организме *U. pictorum* для установления корреляционных связей между структурой загрязнения среды и составом биоаккумулированных частиц.
2. Рассчитать коэффициенты обогащения (Enrichment Factor, EF) для нитевидных, пленочных частиц и фрагметов с целью первичной количественной оценки интенсивности их накопления моллюсками.
3. На основе интегрального анализа полученных индексов (EF и E) охарактеризовать трофическую селективность *U. pictorum* и дать рекомендации по использованию данного вида в качестве биоиндикатора микропластикового загрязнения пресноводных экосистем.

Объекты и методы исследования

Полевые работы выполнялись в 2025 г. на акватории озера Вельё, входящего в состав национального парка «Валдайский» (Новгородская область). Данный водоем характеризуется незначительной антропогенной нагрузкой, что обусловлено его удаленностью от крупных промышленных центров. Интерес изучения данного водного объекта состоит в особенностях его использования как в рекреационных целях, так и хозяйственно-бытовых. Исследование проводилось при поддержке кафедры биологии, экологии и гистологии ФГБОУ ВО «СПбГУВМ».

Сбор моллюсков осуществлялся методом ручного обследования прибрежной зоны. Отобранные экземпляры перловицы обыкновенной (*Unio pictorum*) помещались в стерильные герметичные контейнеры для исключения кросс-контаминации и потери биологического материала. Временной интервал от момента изъятия моллюсков из среды до начала их обработки не превышал 60 мин. Общая выборка составила 20 половозрелых особей в возрастном диапазоне от 5 до 9 лет.

Параллельно с отбором зообентоса производили забор поверхностной воды. Пробы отбирали в том же биотопе с горизонта 0,5 м при помощи планктонной сети Джеди, соответствующей требованиям количественного учета взвешенных веществ. Дальнейшая работа с пробами воды базировалась на протоколах Национального управления океанических и атмосферных исследований США (NOAA) [5]. Вопросы хранения и транспортировки гидрохимических образцов регламентировались положениями ГОСТ 31861-2012 [1].

Для выделения твердых взвешенных частиц из воды использовали метод последовательной фильтрации через бумажные лабораторные фильтры с различной пропускной способностью («Белая лента» и «Красная лента»). Визуальный учет и идентификацию микропластика

проводили методом сплошного просмотра фильтров под цифровым микроскопом Smartron 1600X с регистрацией изображений подозрительных фрагментов.

Учитывая высокую распространенность микрочастиц пластика, особенно волокнистой морфологии, в воздушной среде лабораторий, а также широкое использование полимерных материалов в оснащении рабочих мест, на всех этапах исследования (от пробоподготовки до микроскопии) реализовывалась система мер по контролю фонового загрязнения. Применялись методические подходы, изложенные в работах [3, 5], включающие минимизацию контакта проб с пластиковыми поверхностями, использование при исследовании одежды и лабораторных халатов из хлопчатобумажных материалов.

Для оценки интенсивности накопления микропластика рассчитывали коэффициент обогащения (Enrichment Factor, EF) для каждого морфотипа микропластиковых частиц по следующей формуле:

$$EF = \frac{\text{концентрация МП частиц в смыве}}{\text{концентрация МП частиц в пробе воды}}.$$

Результаты

Качественный и количественный анализ содержания микропластика (таблица) говорит об абсолютном преобладании нитевидных частиц над фрагментами и плёнками: общее количество всех нитевидных частиц у особей составило 63,43 % от общего числа всех микропластиковых фрагментов, при этом фрагментов – 34,98 %, плёнок – 1,59 %. В пробе воды также подтверждается данная тенденция: 71,56 % составляют нитевидные фрагменты, фрагменты – 23,22 %, плёнки – 5,22 %.

Показатели содержания микропластиковых частиц

Microplastic particle content indicators

Тип микропластиковых частиц	Усреднённые показатели содержания микропластика в смывах моллюсков, ед./особь	Частицы микропластика в воде озера Вельё, ед./л
Нитевидные, общие показатели	94,3	151
Чёрные	58,35	89
Синие	6,75	13
Красные	28,25	44
Зелёные	0,35	0
Белые	0,6	5
Фрагменты, общие показатели	52	49
Чёрные	40,45	34
Синие	11,1	9
Белые	0,45	6
Плёнки, белые	2,35	11
Всего	148,65	211

Среди нитевидных частиц доминируют чёрные и синие волокна, белые и зеленые волокна встречаются значительно реже. Аналогичная картина наблюдается в пробе воды.

Далее нами был произведён расчёт коэффициента обогащения (Enrichment Factor, EF) [2] по усреднённым данным смывов моллюсков и данным по содержанию микропластиковых частиц в озере Вельё.

$$EF_{\text{нитевидные}} = 94{,}3/151 \approx 0{,}62.$$
$$EF_{\text{фрагментов}} = 52/49 \approx 1{,}06.$$
$$EF_{\text{плёнки}} = 3{,}13/11 \approx 0{,}28.$$

Полученные значения коэффициентов обогащения для различных форм микропластиков говорят не только об их пассивном поглощении, но и о селективности их накопления. Фрагменты накапливаются в организме моллюска с незначительным превышением их содержания в воде. Это может быть связано с их размером, плотностью и гидродинамическими свойствами, которые делают их наиболее «удобными» для захвата и удержания фильтрующим аппаратом перловицы, в отличие от плёнок, обладающих большей плавучестью. Накопление нитей составляет около 62 % от их концентрации в воде, следовательно, несмотря на их массовое присутствие в окружающей среде, организм перловицы менее эффективно их удерживает или активнее выводит. Длинные и волокна (≥1,5 мм) могут быстрее проходить через пищеварительную систему, не задерживаясь, составляя 32,2 % от всех нитевидных фрагментов.

Заключение

В результате проведенного исследования установлено, что в условиях низкой антропогенной нагрузки озера Вельё (национальный парк «Валдайский») микропластиковое загрязнение представлено преимущественно нитевидными частицами, доля которых в воде составляет 71,6 %, а в организме *Unio pictorum* – 63,4 % от общего пула. Выявленное цветовое распределение (доминирование черных, красных и синих волокон) свидетельствует об антропогенных источниках поступления микропластика в водоем, связанных с деструкцией упаковочных материалов, износом синтетического текстиля и фрагментацией рыболовных снастей.

Показано, что перловица обыкновенная аккумулирует микропластик избирательно, о чем свидетельствуют рассчитанные коэффициенты обогащения (EF). Максимальная интенсивность накопления отмечена для фрагментированных частиц (EF = 1,06), что превышает показатели для нитевидных частиц (EF = 0,62) и пленок (EF = 0,28). Данный результат указывает на то, что фрагменты, близкие по размерным характеристикам к пищевым объектам, удерживаются фильтрационным аппаратом моллюска эффективнее, тогда как нити и пленки либо быстрее выводятся с псевдофекалиями, либо обладают меньшей биодоступностью.

Выявлена зависимость удержания нитевидных частиц от их линейных размеров: доля длинных волокон (≥ 1,5 мм) в организме моллюсков составляет лишь 32,2 % от общего количества нитей, что позволяет предположить их элиминацию на этапе предварительной сортировки частиц в мантийной полости. Данный факт подтверждает гипотезу о селективном характере аккумуляции, опосредованном морфофункциональными особенностями фильтрационного аппарата *U. pictorum*.

Установлена высокая степень корреляции между цветовым распределением нитевидных частиц в воде и в моллюсках (коэффициент корреляции Пирсона $r = 0,97$; $p < 0,05$), что подтверждает репрезентативность *U. pictorum* как биоиндикатора микропластикового загрязнения водной толщи. Вид может быть рекомендован для включения в программы экологического мониторинга пресноводных экосистем с целью оценки трофического переноса микропластика и связанных с ним экологических рисков.

Полученные данные имеют не только фундаментальное, но и прикладное значение в контексте продовольственной безопасности. Поскольку двустворчатые моллюски употребляются в пищу целиком, выявленная селективность накопления фрагментированных форм микропластика требует учета при гигиенической оценке продукции пресноводного промысла. Перловица обыкновенная, выступая в роли активного селективного фильтратора, осуществляет трансформацию качественного состава взвешенного микропластика, что необходимо принимать во внимание при моделировании миграции частиц по трофическим цепям и оценке рисков для здоровья населения.

Список источников

1. ГОСТ 31861-2012. Вода. Общие требования к отбору проб.

2. Основы биологического мониторинга : учебное пособие / В. А. Жигульский, В. Ф. Шуйский, А. И. Потапов, Н. А. Соловей, Н. С. Царькова, Т. С. Былина. СПб. : Нестор-История, 2012. 70 с.

3. Кизеев А. Н., Сюрин С. А. Пластик в биосфере – риски биоте и здоровью населения России // Здоровье населения и среда обитания – ЗНиСО. 2023;31(5):41–51. https://doi.org/10.35627/2219-5238/2023-31-5-41-51.

4. СТП ИМБИ_028-2016. Стандарт предприятия ИМБИ 2016 г. Методика анализа мезо- и микропластикового загрязнения морских и прибрежных экосистем: грунтов песчаных и галечных пляжей, различных горизонтов пелагиали, донных субстратов и мягких тканей гидробионтов. Севастополь, 2016. 18 с.

5. Arthur, Courtney; Baker, Joel; Bamford, Holly. Proceedings of the International Research Workshop on the Occurrence, Effects and Fate of Microplastic Marine Debris // NOAA Technical Memorandum : journal. 2009. January. URL: https://www.researchgate.net/publication/285484205/ (дата обращения : 12.02.2026).

6. Chuiko, G. M., Kholmogorova, N. V. & Zharikov, G. P. Influence of Microplastics on Freshwater Bivalves (Review). Inland Water Biol 17. 879–899 (2024). https://doi.org/10.1134/S199508292470055X (дата обращения : 28.02.2026).

7. Domogalla-Urbansky, Janina & Anger, Philipp & Ferling, Hermann & Rager, Florian & Wiesheu, Alexandra & Niessner, Reinhard & Ivleva, Natalia & Schwaiger, Julia. (2019). Raman microspectroscopic identification of microplastic particles in freshwater bivalves (Unio pictorum) exposed to sewage treatment plant effluents under different exposure scenarios. Environmental Science and Pollution Research. 26. 10.1007/s11356-018-3609-3 (дата обращения : 28.02.2026).

8. Li J, Lusher AL, Rotchell JM, Deudero S, Turra A, Bråte ILN, Sun C, Shahadat Hossain M, Li Q, Kolandhasamy P, Shi H. Using mussel as a global bioindicator of coastal microplastic pollution. Environ Pollut. 2019 Jan;244:522–533. doi: 10.1016/j.envpol.2018.10.032. Epub 2018 Oct 9. PMID: 30368156. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30368156/ (дата обращения : 13.02.2026)

9. Rochman, Chelsea & Hoh, Eunha & Kurobe, Tomofumi & Teh, Swee. (2013). Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic stress. Scientific reports. 3. 3263. 10.1038/srep03263 (дата обращения : 12.02.2026).

10. World Health Organization (WHO). Microplastics in drinking-water. Geneva: World Health Organization. URL: https://www.who.int/news/item/20-08-2019-microplastics-in-drinking-water (дата обращения : 15.02.2026).

Сведения об авторах

З. Г. Каурова – кандидат биологических наук, доцент кафедры биологии, экологии и гистологии.

У. Р. Сычёва – студент 3-го курса.

Information about the authors

Z. G. Kaurova – PhD in Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Biology, Ecology and Histology.

U. R. Sycheva – 3rd year student.

Статья поступила в редакцию 11.03.2026; одобрена после рецензирования 21.04.2026; принята к публикации 11.05.2026.

The article was submitted 11.03.2026; approved after reviewing 21.04.2026; accepted for publication 11.05.2026.

© Каурова З. Г., Сычева У. Р., 2026.

«Закономерности биоаккумуляции микропластика фильтрующими гидробионтами на примере *Unio pictorum* в озере Вельё национального парка «Валдайский» [Каурова З. Г., Сычева У. Р.] распространяется под лицензией Creative Commons Attribution (CC BY 4.0).