

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**МАТЕРИАЛЫ  
I ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ  
ПО ЗАГРЯЗНЕНИЮ  
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ МИКРОПЛАСТИКОМ  
«MicroPlasticsEnvironment-2022»  
(MPE-2022)**

**02–06 августа 2022 г.  
п. Шира, Хакасия**

*Общая редакция Ю.А. Франк*

Томск  
Издательство Томского государственного университета  
2022

УДК 504.064.2:504.4.054:574.5  
ББК 28  
М34

М34      Материалы I Всероссийской конференции с международным участием по загрязнению окружающей среды микропластиком «MicroPlasticsEnvironment-2022» (МРЕ-2022), 02–06 августа 2022 г., п. Шира, Хакасия / общ. ред. Ю.А. Франк. – Томск : Издательство Томского государственного университета, 2022. – 132 с.

ISBN 978-5-907572-03-4

В сборнике представлены материалы докладов конференции по загрязнению окружающей среды микропластиком.

Рассматриваются распространение, источники загрязнения, поведение, биодоступность и биоаккумуляция частиц микропластика в водной среде и прибрежных зонах, методология изучения микропластика.

Для широкого круга специалистов: экологов, гидрохимиков, гидрофизиков, биологов, токсикологов.

УДК 504.064.2:504.4.054:574.5  
ББК 28

*Сборник материалов опубликован при финансовой поддержке  
Программы развития Томского государственного университета  
(Приоритет-2030).*

ISBN 978-5-907572-03-4      © Томский государственный университет, 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Чубаренко И.П., Есюкова Е.Е.</b> Распределение микропластика в толще воды и отложениях Балтийского моря .....	7
<b>Казмирук В.Д.</b> Микропластик в водных объектах: источники и некоторые особенности поведения частиц .....	11
<b>Симакова А.В., Вареницина А.А., Бабкина И.Б., Андреева Ю.В., Багиров Р.Т.-о., Франк Ю.А.</b> Количественная оценка онтогенетического переноса микропластика у насекомых с метаморфозом на примере кровососущих комаров <i>Aedes aegypti</i> L. (Diptera: Culicidae) .....	16
<b>Поздняков Ш.Р., Иванова Е.В., Тихонова Д.А.</b> Исследование загрязнения микропластиком акватории и пригоков Ладожского озера .....	19
<b>Рахматуллина С.Н., Лемешко Я.Р., Воробьев Е.Д., Бабкина И.Б., Воробьев Д.С., Франк Ю.А.</b> Детекция микропластика в желудочно-кишечном тракте пресноводных рыб на примере обитателей речной системы Оби .....	24
<b>Ишмухаметов И.Р., Баташева С.Н., Фахруллина Г.И., Фахруллин Р.Ф.</b> Экспресс-идентификация микропластика в фибробластах человека на основе усиленной темнопольной микроскопии и глубокого обучения .....	29
<b>Кизеев А.Н., Сюрин С.А.</b> Микропластик как фактор риска для функционирования арктических водных экосистем и здоровья человека .....	33
<b>Степанова Н.Ю., Шевчук К.А., Кузьмин Л.С., Гайсин А.Р.</b> Содержание микропластика в абиотических и биотических компонентах Мешинского залива (республика Татарстан) .....	38
<b>Казмирук В.Д.</b> Почему в зарослях макрофитов много микропластика: действующие механизмы .....	43
<b>Бирицкая С.А., Долинская Е.М., Теплых М.А., Ермолаева Я.К., Пушница В.А., Бухаева Л.Б., Лавникова А.В., Коркина Т.В., Голубец Д.И., Карнаухов Д.Ю., Зилов Е.А.</b> Поглощение и выведение флуоресцентных частиц микропластика брюхоногими моллюсками озера Байкал .....	48
<b>Колобов М.Ю., Таланина Е.Б.</b> Многолетняя динамика содержания микропластика в поверхностных водах озера Байкал .....	53
<b>Воробьев Е.Д., Трифонов А.А., Рахматуллина С.Н., Воробьев Д.С., Франк Ю.А.</b> Внутригодовая динамика содержания микропластика в поверхностных водах реки Томи .....	58

<b>Холмогорова Н.В., Чуйко Г.М.</b> Методы отбора и фиксации проб пресноводного макрозообентоса для детекции микропластика .....	63
<b>Куранова В.Н., Рогачева Ю.А., Рахматуллина С.Н., Франк Ю.А.</b> Потребление микропластика сибирской лягушкой <i>Rana amurensis</i> Boulenger, 1886 в Западном Прибайкалье на разных стадиях онтогенеза .....	67
<b>Полякова М.С., Ильина О.В., Ильинский В.В., Блиновская Я.Ю., Алексеева Ю.Г., Соколова А.В.</b> Загрязнение озера Байкал пластиком: генезис, количественные показатели и перспективы ликвидации .....	73
<b>Кривошлык П.Н., Чубаренко И.П.</b> Зависимость содержания микропластика от гранулометрических показателей осадков прибойной зоны Балтийского моря .....	78
<b>Бочерикова И.Ю., Чубаренко И.П.</b> Частицы пластика в морском и пресном льду: результаты лабораторного эксперимента .....	82
<b>Погожева М.П., Котова Е.И., Микушева М.А., Кожевников А.Ю., Данилова Е.В., Якушев Е.В.</b> Мониторинг плавающего морского мусора, поступающего в Белое море с водами р. Северная Двина и р. Онега .....	86
<b>Мерзляков О.Э., Ручкина К.В.</b> Микропластик в почвах: разработка методик детекции на примере агропочв Западной Сибири .....	91
<b>Франк Ю.А., Воробьев Е.Д., Трифонов А.А., Лемешко Я.Р., Воробьев Д.С.</b> Загрязнение речной экосистемы микропластиком на примере притока Енисея, р. Нижняя Тунгуска .....	95
<b>Погожева М.П., Березина А.В., Жданов И.А., Осадчиев А.А., Ханке Г., Якушев Е.В.</b> Распределение плавающего морского мусора в арктических морях России в связи с океанографическими характеристиками .....	101
<b>Тропин Н.Ю.</b> Пищевые стратегии пресноводных рыб и потребление ими микропластика .....	106
<b>Лобчук О.И., Лазарюк А.Ю., Чубаренко И.П.</b> Результаты обработки керна льда из бухты Новик (Японское море) .....	110
<b>Никитин О.В., Насырова Э.И., Кузьмин Р.С., Миннегулова Л.М., Латыпова В.З.</b> Влияние микрочастиц полистирола на морфофункциональные показатели <i>Daphnia magna</i> .....	113
<b>Ершова А.А., Ерёмкина Т.Р.</b> Мониторинг морского мусора на пляжах и в водной толще в российской части Финского залива .....	118
<b>Макеева И.Н., Ершова А.А.</b> Особенности детекции микропластика в донных отложениях .....	122
<b>Педченко А.П.</b> Оценка содержания микропластика в водах арктических морей: результаты мониторинга 2019–2020 гг. ....	126

## CONTENT

<b>Chubarenko I.P., Esiukova E.E.</b> Distribution of microplastics in water column and sediments of the Baltic sea.....	7
<b>Kazmiruk V.D.</b> Microplastics in waters: the sources and some features of particle behavior.....	11
<b>Simakova A.V., Varenitsina A.A., Babkina I.B., Andreeva Yu.V., Bagirov R.T-o., Frank Y.A.</b> Ontogenetic transfer of microplastics in insects with metamorphosis on the example of bloodsucking mosquitoes <i>Aedes aegypti</i> L. (Diptera: Culicidae) .....	16
<b>Pozdnyakov Sh.R., Ivanova E.V., Tikhonova D.A.</b> The study of microplastic pollution of lake Ladoga and its tributaries .....	19
<b>Rakhmatullina S.N., Lemeshko Y.R., Vorobiev E.D., Babkina I.B., Vorobiev D.S., Frank Y.A.</b> Detection of microplastics in the gastrointestinal tract of freshwater fish: example of the Ob river system inhabitants.....	24
<b>Ishmukhametov I.R., Batasheva S.N., Fakhrullina G.I., Fakhrullin R.F.</b> Express identification of microplastics in human fibroblasts based on enhanced darkfield microscopy and deep learning .....	29
<b>Kizeev A.N., Syurin S.A.</b> Microplastics as a risk factor for the functioning of arctic aquatic ecosystems and for human health .....	33
<b>Stepanova N.Yu., Shevchuk K.A., Kuzmin L.S., Gaisin A.R.</b> Microplastic content in abiotic and biotic components of the Meshinsky bay (Republic of Tatarstan) .....	38
<b>Kazmiruk V.D.</b> Why the macrophyte thickets have large quantities of microplastics? The mechanisms underlying this phenomenon .....	43
<b>Biritskaya S.A., Dolinskaya E.M., Teplykh M.A., Ermolaeva Ya.K., Pushnitsa V.A., Bukhaeva L.B., Lavnikova A.V., Korkina T.V., Golubets D.I., Karnaukhov D.Yu., Zilov E.A.</b> Uptake and excreting fluorescent parts of microplastics by gastropods of Lake Baikal .....	48
<b>Kolobov M.Yu., Talanina E.B.</b> Long-term dynamics of microplastics in surface waters of Lake Baikal .....	53
<b>Vorobiev E.D., Trifonov A.A., Rakhmatullina S.N., Vorobiev D.S., Frank Y.A.</b> Intra-annual dynamics of microplastic content in the surface water of the River Tom .....	58
<b>Kholmogorova N.V., Chuiko G.M.</b> Methods of sampling and fixation of freshwater macrozoobenthos for the detection of microplastics .....	63
<b>Kuranova V.N., Rogacheva Y.A., Rakhmatullina S.N., Frank Y.A.</b> Microplastic uptake by Siberian frog <i>Rana amurensis</i> Boulenger, 1886 in the West Baikal region at different ontogenetic stages .....	67

<b>Polyakova M.S., Ilyina O.V., Il'insky V.V., Blinovskaya Ya.Yu., Alexeeva Yu.G., Sokolova A.V.</b> Plastic pollution of the Lake Baikal. Abundance, composition and prospects for cleanups .....	73
<b>Krivoshlyk P.N., Chubarenko I.P.</b> Dependence of microplastic content on granulometric indicators in the sediments of the surf zone of the sea .....	78
<b>Bocherikova I.Yu., Chubarenko I.P.</b> Plastic particles in sea and fresh ice: Results of the laboratory experiment .....	82
<b>Pogojeva M.P., Kotova E.I., Mikusheva M.A., Kozhevnikov A.Yu., Danilova E.V., Yakushev E.V.</b> Monitoring of floating riverine litter input of the Northern Dvina and Onega rivers to the White sea .....	86
<b>Merzlyakov O.E., Ruchkina K.V.</b> Microplastics in soils: development of the detection methods on the example of agro-soils in West Siberia .....	91
<b>Frank Y.A., Vorobiev E.D., Lemeshko Y.R., Trifonov A.A., Vorobiev D.S.</b> Microplastic pollution of a riverine system: example of the Yenisei tributary, the Nizhnyaya Tunguska River .....	95
<b>Pogojeva M.P., Berezina A.V., Zhdanov I.A., Osadchiev A.A., Hanke G., Yakushev E.V.</b> Distribution of floating marine macro-litter in relation to oceanographic characteristics in the Russian Arctic seas .....	101
<b>Tropin N.Y.</b> Feeding strategies in freshwater fish and microplastic consumption .....	106
<b>Lobchuk O.I., Lazaryuk A.Yu., Chubarenko I.P.</b> Results of ice core processing from Novik bay (Sea of Japan) .....	110
<b>Nikitin O.V., Nasyrova E.I., Kuzmin R.S., Minnegulova L.M., Latypova V.Z.</b> Effects of polystyrene microparticles on the morphofunctional parameters of <i>Daphnia magna</i> .....	113
<b>Ershova A.A., Eremina T.R.</b> Monitoring of marine litter on the beaches and in the water column in the Russian part of the Gulf of Finland .....	118
<b>Makeeva I.N., Ershova A.A.</b> Features of microplastic detection in bottom sediments .....	122
<b>Pedchenko A.P.</b> Assessment of microplastic content in the waters of the Arctic seas: monitoring results 2019–2020 .....	126

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОПЛАСТИКА В ТОЛЩЕ ВОДЫ И ОТЛОЖЕНИЯХ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

И.П. Чубаренко, Е.Е. Есюкова

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия,  
irina\_chubarenko@mail.ru, elena\_esiukova@mail.ru*

**Аннотация.** Коллектив российских исследователей из АО ИО РАН (лаборатория физики моря) на основе сотен собранных образцов донных и пляжевых отложений, морской воды и макрофитов, провели качественный и количественный анализ их загрязнения частицами микропластика (МП). Применялись как стандартные, так и разработанные методики отбора и приборы (дочерпатель Ван Вина, манга-трал, батометры Нискина, установка PLEX и др.). В 2015–2022 гг. проводился регулярный мониторинг пляжей, отбор, обработка проб песка. Для извлечения МП из образцов использовался в основном модифицированный метод NOAA.

**Ключевые слова:** микропластик, морской мусор, Балтийское море, загрязнение.

Нарастающей проблемой планетарного масштаба является загрязнение морской среды пластиком, особенно частицами микропластика (МП, <5 мм). В 2019 г. в мире было произведено около 370 млн т пластика [1]. Менее 1% пластика плавает на поверхности в океанских круговоротах, в то время как 67–77% находится на пляжах или в прибрежных водах [2]. В прибойной зоне моря процесс механического разрушения фрагментов пластика переводит фрагменты из мега- (>1 м) и макроразмера (>25 мм) в другой размерный диапазон – мезо- (>5 мм) и микрочастицы (<5 мм) [3].

*Загрязнение пластиком абиотических сред Балтийского моря. Пляжный мусор.* Метод граблей для песка (Rake-method), разработанный для крупного мусора (2–5 мм) и мезомусора (5–25 мм), использовали для количественной оценки загрязнения 35 пляжей вдоль всего побережья Балтийского моря [4]. Среднее количество частиц антропогенного мусора составило  $0,91 \pm 1,50$  (медиана 0,40) шт./м<sup>2</sup>.

*Пляжный мусор разных размерных фракций и МП.* Используя метод граблей (Rake-method) и метод рамок (Frame-method), проведена оценка загрязнения поверхности песчаных пляжей пластиком, макромусором, мезомусором, крупным мусором, крупным МП (L-MPs, 2–5 мм) и

мелким МП (S-MPs, 0,5–2 мм) в четырех пляжных зонах вдоль 100-километрового морского побережья национального парка Куршская коса [5, 6]. Количество пластиковых объектов (в шт./м<sup>2</sup>) составило в среднем 0,85 (медиана 0,33) для макро-, 1,48 (0,40) для мезо-, 3,35 (0,68) для большого мусора и 3235 (1800) для МП (0,5–5 мм). Распределение мусора и МП сильно варьируется вдоль и поперек пляжа, но количество S-MPs в зоне приобья одинаково для всех точек отбора и при повторных выборках.

Установлено распределение S-MPs, L-MPs и мезопластика в поверхностном слое пляжей в национальных парках, заповедных и рекреационных зонах вдоль южного побережья Балтийского моря (Польша и Германия) [7]. Загрязнение МП (0,5–5 мм) составляет в среднем 68±117 (медиана 33) шт./кг сух. веса. Повсеместно наиболее загрязненной оказалась зона текущего заплеска для S-MPs: в среднем 60,1(±36,6) шт./кг сух. веса. Достаточно стабильная картина загрязнения для S-MPs на линии уреза (диапазон от 21,0 до 58,1), при общем среднем 30,4±13,7 шт./кг сух. веса. Фрагменты пенополистирола составили около 38% от общего количества обнаруженных частиц МП, что согласуется с результатами исследований [8] для побережья Калининградской области.

*МП в зарослях макрофитов.* Даны количественные оценки загрязнения МП (0,2–5 мм) макроводорослей в их сухом весе и вод за пределами / внутри зарослей макрофитов на подводном склоне в юго-восточной части Балтийского моря (ЮВБ) [9]. В воде внутри зарослей концентрации МП выше в среднем в 1,7 раза (диапазон 1,1–5,3), чем в воде вне зарослей. Это загрязнение на два порядка больше, чем в открытых водах Балтийского моря. Для водорослей, произрастающих на валунах, содержание МП составило 1245±1020 (от 48 до 3088) шт./м<sup>2</sup>. В килограмме сухой массы водорослей содержание МП 376±404 шт./кг сух. веса. Эта величина на порядок выше, чем в песках зоны приобья в данном районе. Очевидно, что акватории, покрытые морской травой, гораздо более загрязнены, чем вода и наносы в данном районе.

*Трехмерное распределение МП в песках пляжа.* Показано, что внешние океанографические условия, а не антропогенное воздействие формируют трехмерное распределение антропогенных микрочастиц (МП, 0,5–5 мм) в толще песчаных пляжей (на примере ЮВБ) [10].

Подтверждается неоднородная, пятнистая структура распределения МП (от 2 до 572, при среднем значении 108 шт./кг сух. веса), с фоновыми концентрациями МП в толще пляжа по вертикали (10–60 шт./кг сух. веса) и пиковыми значениями ~150–350 шт./кг сух. веса); макси-

мальное содержание МП ~400–600 шт./кг сух. веса обнаруживается на линиях штормовых заплесков на поверхности пляжа.

*МП в водной толще Балтийского моря.* Показано [11], что содержание МП (0,5–5 мм) в толще воды (диапазон глубин от 0 до 217,5 м в собственно Балтийском море) составило  $0,40 \pm 0,58$  шт./л (отбор проб с помощью батометров Нискина). При использовании в ЮВБ разработанного в АО ИО РАН прибора PLEX (PLastic EXplorer) для отбора проб воды (до 2–3 м<sup>3</sup>) с различных горизонтов водного столба (от поверхности до дна) [12], получено среднее (по объему) содержание частиц МП  $32,2 \pm 50,4$  шт./м<sup>3</sup>, с диапазоном от 11,1 до 79,1 шт./м<sup>3</sup> на различных станциях.

*Донные отложения Балтийского моря.* По результатам 8 экспедиций (53 станции) на глубинах от 3 м до 215 м в собственно Балтийском море получены концентрации МП (0,2–5 мм) – от 103 до 10 179, в среднем  $876 \pm 1427$  (медиана 519) шт./кг сух. веса [13]. В то же время первые исследования в Гданьском заливе (глубины 3–30 м) показали среднюю концентрацию МП (0,5–5 мм)  $34 \pm 10$  (от 12,0 до 48,4) шт./кг сух. веса [14].

*Экспедиционные работы поддержаны грантом Российского научного фонда № 19-17-00041. Обработка проб выполнена в рамках государственного задания (№ FMWE-2021-0012).*

#### Список источников

1. Plastics – the Facts 2020 // PlasticsEurope, 2020. URL: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2020/>.
2. Onink V., Jongedijk C. E., Hoffman M. J., van Sebille E., Laufkötter, C. Global Simulations of marine Plastic Transport Show Plastic Trapping in Coastal Zones // Environ. Res. Lett. 2021. V. 16. 064053.
3. Chubarenko I., Efimova I., Bagaeva M., Bagaev A., Isachenko I. On mechanical fragmentation of single-use plastics in the sea swash zone with different types of bottom sediments: Insights from laboratory experiments // Mar. Pollut. Bull. 2020a. № 150. 110726.
4. Haseler M., Balciunas A., Hauk R., Sabaliauskaite V., Chubarenko I., Ershova A., Schernewski G. Marine litter pollution in Baltic sea beaches – application of the sand rake method // Front. Environ. Sci. 2020. V. 8. 599978.
5. Chubarenko I., Esiukova E., Khatmullina L., Lobchuk O., Grave A., Kilesa K., Haseler M. From macro to micro, from patchy to uniform: analyzing plastic contamination along and across a sandy tide-less coast // Mar. Pollut. Bull. 2020b. V. 156. 111198.
6. Esiukova E., Khatmullina L., Lobchuk O., Grave A., Kilesa A., Haseler M., Zyubin A., Chubarenko I., From macro to micro: dataset on plastic

- contamination along and across a sandy tide-less coast (the Curonian Spit, the Baltic Sea) // Data in brief. 2020. V. 30. 105635.
7. Esiukova E., Lobchuk O., Haseler M., Chubarenko I. Microplastic contamination of sandy beaches of National Parks, protected and recreational areas in southern parts of the Baltic Sea // Mar. Pollut. Bull. 2021. V. 173. 113002.
  8. Esiukova E. Plastic pollution on the Baltic beaches of the Kaliningrad region, Russia // Mar. Pollut. Bull. 2017. V. 114. P. 1072–1080.
  9. Esiukova E.E., Lobchuk O.I., Volodina A.A., Chubarenko I.P. Marine macrophytes retain microplastics // Mar. Pollut. Bull. 2021. V. 171. 112738.
  10. Chubarenko I.P., Esiukova E.E., Bagaev A.V., Bagaeva M.A., Grave A.N. Three-dimensional distribution of anthropogenic microparticles in the body of sandy beaches of a non-tidal sea and its oceanographic causes // Sci. Total Environ. 2018. V. 628–629. P. 1340–1351.
  11. Bagaev A., Khatmullina L., Chubarenko I. Anthropogenic microliter in the Baltic Sea water column // Mar. Pollut. Bull. 2018. V. 129. P. 918–923.
  12. Zobkov M.B., Esiukova E.E., Zyubin A.Y., Samusev I.G. Microplastic content variation in water column: the observations with novel sampling tool in stratified Baltic Sea // Mar. Pollut. Bull. 2019. V. 138. P. 193–205.
  13. Esiukova E., Zobkov M., Chubarenko I. Data on microplastic contamination of the Baltic Sea bottom sediment samples in 2015-2016 // Data in brief. 2020. V. 28. 104887.
  14. Zobkov M., Esiukova E. Microplastics in Baltic Bottom Sediments: quantification procedures and first results // Mar. Pollut. Bull. 2017. V. 114. P. 724–732.

## DISTRIBUTION OF MICROPLASTICS IN WATER COLUMN AND SEDIMENTS OF THE BALTIC SEA

**I.P. Chubarenko, E.E. Esiukova**

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia  
irina\_chubarenko@mail.ru, elena\_esiukova@mail.ru*

**Abstract.** The team of Russian researchers from SIO RAS (Atlantic Branch, Laboratory for Marine Physics) conducted a qualitative and quantitative analysis of contamination with microplastic particles of hundreds of collected samples of bottom and beach sediments, sea water and macrophytes. Both standard and developed sampling methods and instruments were used (Van Veen grab, manta trawl, Niskin water samplers, PLEX pump). Beaches were regularly monitored in 2015-2022, and sand samples were taken and processed. For the extraction of MPs from samples, a modified NOAA method was mainly used.

**Keywords:** microplastics, marine litter, the Baltic Sea, contamination

## МИКРОПЛАСТИК В ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ: ИСТОЧНИКИ И НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ЧАСТИЦ

В.Д. Казмирук

*ФГБУН Институт водных проблем РАН, Москва, Россия, kazm@iwpr.ru*

**Аннотация.** Основными источниками микропластика в водных объектах являются: потери первичных гранул при их производстве, транспортировке, перегрузке и повторной переработке, сточные воды, истирание автомобильных шин и дорожного покрытия, синтетическая одежда, разрушение пластмассовых изделий, атмосферные выпадения. Микрочастицы из полиэтилена высокой плотности и полиэтилентерефталата при определённых условиях могут находиться на поверхности воды, в ее толще или на дне, а частицы из пенополистирола в прибойной зоне выбрасываются на берег, где происходит их депонирование и захоронение.

**Ключевые слова:** микропластик, источники, поведение, водный объект

Среди микрочастиц антропогенного происхождения, наиболее часто встречающихся в водных объектах, основное разнообразие, как по материалам, так и источникам поступления, принадлежит синтетическим полимерным материалам. По данным Федеральной службы государственной статистики, в 2020 г. в России было произведено 10,2 млн т полимерных смол, что составляет около 2,7% мирового производства. Основная масса этих смол поставляется как сырье в виде гранул, порошков и хлопьев. То, что часть этих микрочастиц теряется во время производства, транспортировки, перегрузки и повторной переработки в конечные пластиковые изделия или более сложные компоненты, а также во время вторичной переработки пластика, говорят факты со всего мира.

Другим массовым неконтролируемым, постоянным, широко распространенным и, кроме того, очевидным источником микропластика являются частицы пыли от истирания автомобильных и мотоциклетных шин, а также дорожного покрытия и разметки. Около 70–85% состава автомобильных шин состоит из натурального или бутадиенстирольного каучука и наполнителя. Средняя эмиссия в окружающую среду от шинной пыли для разных стран колеблется в пределах 0,2–5,5 кг на человека в год [1].

Механической абразии и продуцированию микрочастиц подвержены любые предметы из пластика во время их производства, транспортировки и использования. Фрагменты красок и напылений на полимерной основе могут попасть в окружающую среду при любом защитном окрашивании, использовании окрашенных изделий, удалении краски, а также при ее разливе. Значительная часть микропластика, и большая его часть по весу, формируется непосредственно в окружающей среде в результате деградации макропластикового мусора или пластиковых изделий под совокупным воздействием физических, химических и биологических процессов.

Особого внимания как источник микропластика заслуживают сточные воды. В сточные воды попадает часть пластиковых микроизделий, промышленных абразивов, полиролей, чистящих средств, очистителей контактных линз, микрочастиц при полировке линз для очков, струйных порошков, частиц для переноса в организме активных медицинских препаратов, порошков для 3D печати, шинной пыли. Однако, основную долю микропластиков в сточные воды, особенно муниципальные, привносят микропластики из средств личной гигиены и микроволокна в результате стирки синтетического текстиля. Попадание микропластика в водные объекты со сточными водами всецело зависит от наличия, конструкции и эффективности работы очистных сооружений. Однако, даже при высокой эффективности очистных сооружений и независимо от применяемой технологии очистки, когда в литре очищенных вод содержится лишь несколько микрочастиц, большой ежедневный расход сбрасываемых вод все равно приводит к тому, что в сутки с одного очистного сооружения попадают десятки миллиардов частиц микропластика [2].

Фрагменты пластика, прежде чем попасть в водный объект, должны достаточно длительное время находиться в сточных водах или на загрязненной территории суши, где присутствуют другие загрязнители. Почвенный гумус, органическое вещество из отходов и глинистые частицы, плотность которых в 2,5–2,7 раза выше, имеют высокую степень адгезии к гидрофобным пластиковым материалам. Поэтому, маловероятно, что пластиковые микрочастицы, находясь в сточных водах или перемещаясь по суше под воздействием водных или воздушных потоков, будут иметь плотность исходного полимера.

Если частицы из полиэтилена не загрязнены на суше за время их формирования, они некоторое время плавают по поверхности воды, поскольку плотность этого полимера ниже плотности воды. Кроме того, частицы поддерживаются на поверхности воды силой поверх-

ностного натяжения. Проведенные нами натурные и лабораторные эксперименты показывают, что даже ранее незагрязненные частицы пленок из полиэтилена высокой плотности довольно быстро начинают погружаться в воду. Причина этому наличие в воде и адгезия водного гумуса и взвешенных минеральных частиц, а не биообрастание.

При наличии в лабораторном сосуде макрофитов, перенесенных из естественной среды их произрастания и являющихся источником природных микрочастиц, а также условий перемешивания воды, уже через 24–47 часов более 10% микропленок из полиэтилена высокой плотности со средним размером 4,5 мм погружается в водную толщу и находятся в ней. Дополнительно, примерно такое же количество микропленок опускается на дно. Более мелкие частицы из того же материала (средний размер около 1 мм) начинают погружаться в воду еще быстрее. Через 15–16 часов около 10% микрочастиц уже находятся в толще воды, а в присутствии роголистника темно-зеленого (*Ceratophyllum demersum* L.) эта величина возрастает до 33%. Со временем процесс опускания микропленок в воду только нарастает. Отмечено, что адгезия природных микрочастиц на частицах микропластика начинается и протекает более интенсивно в местах, где имеются неровности поверхности: изгибы, надрывы, расщепления, царапины, потертости.

Среди микрочастиц на основе полимерных материалов массового производства, плотность которых выше воды и которые в обычных условиях должны погружаться в воду, нередко встречаются частицы полиэтилентерефталата. Нами установлено, что, несмотря на высокую плотность базового полимера, микрочастицы из полиэтилентерефталата в виде хлопьев могут длительное время находиться на поверхности воды, поддерживаемые силами поверхностного натяжения. На их нахождение на поверхности слабо влияет скорость течения воды и ветро-волновые перемешивание, а плавучесть сохраняется до тех пор, пока не произойдет разрушение поверхностной пленки во время волнения или дождя и заныряние частиц в воду.

В лабораторных условиях нами наблюдались случаи, когда микрохлопья из полиэтилентерефталата, ранее осевшие на дно, обратно всплывали на поверхность воды. Это происходило, когда в сосуде находились растения, на поверхности которых формировались пузырьки газов или после интенсивного перемешивания. Такие же пузырьки газов, особенно в светлое время суток, формировались на гранях микрохлопьев и, в значительно меньшем количестве, на их верхней плоскости. Средний диаметр пузырьков около 0,5 мм. При неоднородном распределении пузырьков на разных гранях частиц, грань,

на которой пузырьков было больше приподнималась над дном, частица какое-то время находилась в вертикальной плоскости, а затем всплывала на поверхность. При отрыве частицы от дна скорость ее всплывания составляла около 0,03 см/с. Достигнув поверхности воды, пузырьки газов частично схлопывались, но микрочастица оставалась на поверхности воды, поддерживаемая архимедовой силой, силой поверхностного натяжения и, какое-то время, оставшимися прикрепленными пузырьками.

Не менее сложна динамика и миграция пластиковых микрочастиц в виде микросфер из пенополистирола. Микрочастицы из пенополистирола легко сдуваются с суши в ветреную погоду и, на первый взгляд, было бы логично предположить, что, чем сильнее ветер, тем больше микрочастиц попадет в водный объект. В некоторых случаях так и происходит. Например, когда сдутые частицы попадают в закрытый от ветрового волнения залив или, когда скорость ветра достаточна для переноса легких частиц из пенополистирола, но недостаточна для развития ветровых волн. В противном случае, около 80% частиц ветровыми волнами выбрасывается обратно на сушу при их максимальном вертикальном заплеске, где эти частицы и остаются, смешанные с другим, выбрасываемым на берег, мусором и прикрытые им. Из такого состояния частицы пенополистирола уже значительно позже попадут в водный объект, если не будут депонированы и захоронены под слоем минеральных частиц. Только около 20% микрочастиц из пенополистирола остаются в водном объекте в условиях развитого ветрового волнения в прибрежной зоне и береговом источнике их поступления.

*Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2022-0002 Государственного задания ИВП РАН.*

#### **Список источников**

1. Baensch-Baltruschat B., Kocher B., Stock F., Reifferscheid G. Tyre and road wear particles (TRWP) – a review of generation, properties, emissions, human health risk, ecotoxicity, and fate in the environment // Sci. Total Environ. 2020. V. 733. 137823.
2. Liu W., Zhang J., Liu H., Guo X., Zhang X., Yao X., Cao Z., Zhang T. A review of the removal of microplastics in global wastewater treatment plants: characteristics and mechanisms // Environ. Intern. 2021. V. 146. 106277.

## **MICROPLASTICS IN WATERS: THE SOURCES AND SOME FEATURES OF PARTICLE BEHAVIOR**

**V.D. Kazmiruk**

*Water Problems Institute of Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russia, kazm@iwp.ru*

**Abstract.** The main sources of microplastics entering water bodies are: the loss of primary granules during their production, transportation, handling and recycling, waste water, abrasion of automobile tires and road surfaces, synthetic clothing, destruction of plastic products, atmospheric fallout. It is shown that microparticles made of high density polyethylene and polyethylene terephthalate under certain conditions can be on the water surface, in the water column or at the bottom. Particles of expanded polystyrene are thrown onto the shore in the surf zone, where they are deposited and buried.

**Keywords:** microplastics, sources, behavior, water body

**КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ОНТОГЕНЕТИЧЕСКОГО ПЕРЕНОСА МИКРОПЛАСТИКА У НАСЕКОМЫХ С МЕТАМОРФОЗОМ НА ПРИМЕРЕ КРОВОСОСУЩИХ КОМАРОВ *Aedes aegypti* L. (DIPTERA: CULICIDAE)**

**А.В. Симакова, А.А. Вареницина, И.Б. Бабкина,  
Ю.В. Андреева, Р.Т.-о. Багиров, Ю.А. Франк**

*Томский государственный университет, Томск, Россия,  
anastasiasimakova@yahoo.com*

**Аннотация.** В лабораторной культуре исследовали поглощение и накопление микропластика кровососущими комарами *Aedes aegypti* L. В опыте флуоресцентные микрочастицы регистрировались у насекомых всех стадий – от личинок до куколок и имаго. Личинки *Ae. aegypti* потребляли микропластик с пищей, накапливая в среднем  $7,3 \times 10^6$  частиц на личинку за 3 дня. Содержание частиц достоверно снижалось у комаров от стадии личинки к стадии куколки и без значительных потерь – во взрослую стадию. В среднем на куколку приходилось 15,8 экз., на имаго – 10,9 экз. Наши данные подтвердили, что насекомые с метаморфозом могут выносить микропластик из воды на сушу.

**Ключевые слова:** микропластик, флуоресцентные микросферы, кровососущие комары, онтогенетический перенос

В настоящее время микропластик обнаружен у пресноводных организмов практически всех трофических уровней [1–3], получены доказательства возможности его накопления и биомагнификации в пищевые сети пресноводных систем [4]. Кровососущие комары – амфибионтные насекомые с полным превращением, личинки и куколки которых обитают в воде, а имаго – на суше. Поэтому они могут выносить микропластик из воды на сушу. Недавно было получено доказательство онтогенетического переноса микропластика у комаров *Culex pipiens* в лабораторных условиях с использованием шариков флуоресцентного полистирола [5, 6]. Цель нашего исследования – количественная оценка онтогенетического переноса флуоресцентных частиц полистирола у насекомых с метаморфозом на примере комаров *Aedes aegypti*.

В экспериментах использовали флуоресцентные желто-зеленые карбоксилат-модифицированные полистироловые сферы диаметром

2,0±0,2 мкм (Sigma-Aldrich, США). Колонии комаров содержались в лаборатории при постоянных параметрах (температура 25±2°C, относительная влажность 70±5%, освещенность: темнота). Личинок экспериментальной группы выращивали в присутствии микропластика, добавляя частицы в воду в концентрации  $8 \times 10^6$  ед./мл. В эксперименте и контроле случайным образом изымались личинки, куколки и имаго. Микропластик извлекали из комаров путем гомогенизации тканей и органов. Гомогенат просматривали и подсчитывали МЧ под эпифлуоресцентным микроскопом при 400-кратном увеличении (Axio Imager.Z1, Karl Zeiss, Germany). Данные были проанализированы с использованием статистического программного обеспечения R v4.0.5 (R Development Core Team, 2021 г.).

В опыте личинки охотно поедали микропластик вместе с пищей. После трехдневного содержания в аквариуме с микропластиком на одну личинку IV возраста в среднем приходилось 7,3 млн частиц. Выявлен онтогенетический перенос частиц микропластика в куколки в небольшом количестве (15,8 частиц). У взрослых комаров наблюдалось незначительное снижение количества частиц до 10,9 на особь ( $p > 0,05$ ).

Онтогенетический перенос микросфер полистирола выявлен у 92% особей. Соотношение куколок и имаго, в которых не выявлено частиц микропластика, примерно одинаковое.

Наше исследование подтвердило предыдущие данные [5, 6] по наличию онтогенетического переноса МП у насекомых с метаморфозом на примере кровососущих комаров *Aedes aegypti*. Таким образом, экспериментально доказано, что у насекомых с полным превращением микрочастицы могут переходить от питающихся личинок в непитающихся куколок, обитающих в водной среде, и в вылетающих на сушу имаго, однако отмечается значительное снижение количества частиц от личинки к куколке.

*Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).*

#### Список источников

1. Parker B., Andreou D., Green I.D., Britton J R. Microplastics in freshwater fishes: occurrence, impacts and future perspectives // Fish and fisheries. 2021. V. 22. P. 467–488.
2. Gallitelli L., Cera A., Cesarini G., Pietrelli L., Scalici M. Preliminary indoor evidences of microplastic effects on freshwater benthic macroinvertebrates // Sci Rep. 2021. V. 11. 720.

3. Miloloža M., Kučić G.D., Bolanča T., Ukić Š., Cvetnić M., Očelić B. V., Dionysiou D.D., Kušić H. Ecotoxicological assessment of microplastics in freshwater sources – a review // *Water*. 2021. V. 13. 56.
4. Szymańska M., Obolewski K. Microplastics as contaminants in freshwater environments: A multidisciplinary review // *Ecohydrology & Hydrobiology*. 2020. V. 20. P. 333–345.
5. Al-Jaibachi R., Cuthbert R.N., Callaghan A. Up and away: ontogenic transference as a pathway for aerial dispersal of microplastics // *Biol. Lett.* 2018. V. 14. 20180479.
6. Al-Jaibachi R., Cuthbert R.N., Callaghan A. Examining effects of ontogenic microplastic transference on *Culex mosquito* mortality and adult weight // *Science of the total environment*. 2019. V. 651. P. 871–876.

**ONTOGENETIC TRANSFER OF MICROPLASTICS IN INSECTS  
WITH METAMORPHOSIS ON THE EXAMPLE OF BLOODSUCKING  
MOSQUITOES Aedes aegypti L. (DIPTERA: CULICIDAE)**

**A.V. Simakova, A.A. Varenitsina, I.B. Babkina, Yu.V. Andreeva,  
R.T-o. Bagirov, Y.A. Frank**

*Tomsk State University, Tomsk, Russia, anastasiasimakova@yahoo.com*

**Abstract.** Uptake and accumulation of microplastics by bloodsucking mosquitoes *Aedes aegypti* L. were investigated in the laboratory culture. In the experimental group, PS particles were registered in insects of all life stages – from larvae to pupae and adults. *Ae. aegypti* larvae ingested microplastics with food accumulating on average  $7.3 \times 10^6$  items per larva in 3 days. The content of PS microspheres significantly decreased in mosquitoes from the larval stage to the pupal stage, and passed to the adult stage without significant losses. On average 15.8 items were detected per pupa and 10.9 items per imago individual. Our data confirmed that insects with metamorphosis can carry microplastics from water to land.

**Keywords:** microplastics, fluorescent PS microspheres, blood-sucking mosquitoes, ontogenetic transfer

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ МИКРОПЛАСТИКОМ АКВАТОРИИ И ПРИТОКОВ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

Ш.Р. Поздняков<sup>1</sup>, Е.В. Иванова<sup>2</sup>, Д.А. Тихонова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт исследований континентальных водных объектов РГГМУ,  
Санкт-Петербург, Россия, tbgmaster@mail.ru*

<sup>2</sup> *Институт озерадения Российской академии наук, Санкт-Петербургский  
Федеральный исследовательский центр Российской академии наук,  
Санкт-Петербург, Россия, spb.spt@mail.ru*

**Аннотация.** Анализ загрязнения микропластиком Ладожского озера – важный аспект экологических исследований в регионе, что связано с прямым влиянием состояния озера на качество водоснабжения города Санкт-Петербурга. В работе проанализированы концентрации частиц микропластика в пробах воды и донных отложений Ладожского озера, их форма, размер и химический состав. Полученные результаты показали, что самые высокие концентрации микропластика в озере и на его притоках зафиксированы вблизи городских территорий, промышленных объектов и свалок, а также в местах впадения рек.

**Ключевые слова:** микропластик, Ладожское озеро

Ладожское озеро – крупнейшее пресноводное озеро в Европе. Оно расположено на территории Ленинградской области и республики Карелия, площадь его бассейна составляет 258 600 км<sup>2</sup>. В озеро впадают 35 притоков, а вытекающая из него река Нева соединяет озеро с Финским заливом Балтийского моря. Ладожское озеро играет значимую роль в хозяйственной и экономической деятельности прилегающих территорий. Его состояние напрямую влияет на качество водоснабжения Санкт-Петербурга. Также озеро является важным водно-транспортным путем [1].

Ладожское озеро – естественный накопитель загрязнений, поступающих с обширных территорий его водосбора. Существенную нагрузку на бассейн Ладоги оказывают целлюлозно-бумажные, топливно-энергетические, нефтехимические и другие предприятия, а также сельскохозяйственная деятельность [2].

В последние годы к исследованиям экологической ситуации на водосборе добавилось новое направление – анализ загрязнения озера и его притоков частицами микропластика. Микропластик может попа-

дать в озеро со стоками промышленных предприятий и свалок бытовых отходов, а также в результате активного рыбохозяйственного и рекреационного использования территории.

Институт озераведения РАН проводит исследования микропластикового загрязнения водосбора Ладожского озера с 2018 г. Исследования на притоках озера проводятся в разные сезоны года, на акватории – преимущественно в летний сезон.

Пробы воды на акватории озера и его притоках отбираются при помощи специальной фильтрационной установки, разработанной в Институте озераведения [3]. Данная установка позволяет проводить отбор проб воды с различных глубин. При помощи насоса необходимый объем воды, от 100 до 1000 литров (в зависимости от количества планктона и взвеси), прокачивается через металлическую фильтровальную сетку с ячейкой 60 мкм. Количество профильтрованных литров фиксируется при помощи электронного счетчика. Глубина отбора пробы ограничивается только длиной шланга.

Пробы донных отложений (верхние 5 см осадка) отбираются дночерпателем Экмана-Берджа с борта научно-исследовательского судна в летний период и с ледового покрова в зимний период.

Пробы воды. Методы подготовки проб воды для анализа различаются в зависимости от количества планктона в пробе. Если проба визуально содержит незначительное количество планктона и взвеси, то она напрямую смывается с сетки на чашку Петри и анализируется под микроскопом. При наличии большого количества органического материала, проба смывается с сетки в колбу, куда добавляется реактив Фентона (30% раствор перекиси водорода и Fe(II) катализатор) для растворения органического вещества, после чего проба нагревается на водяной бане до 75° и кипятится в течение минимум 40 минут. Далее проба отстаивается в течение суток, фильтруется на металлическую сетку, после чего осадок смывается на чашку Петри и анализируется под микроскопом.

Пробы донных отложений. 100–400 г сухого веса пробы (в зависимости от гранулометрического состава) дважды отстаиваются в 55% растворе  $ZnCl_2$  (1,7 г/см<sup>3</sup>) в течение суток. Далее надосадочная жидкость дважды фильтруется через металлическую сетку с диаметром ячеей 60 мкм.

Осажденный на сетке материал переносится в колбу, куда добавляется реактив Фентона для растворения органического материала. Проба кипятится на водяной бане при 75 градусах в течение минимум 40 минут. После кипячения раствор отстаивается сутки и фильтруется

через металлическую сетку с ячейкой 60 мкм. Осадок с сетки смывается для повторного плотностного отделения в центрифуге, после чего надосадочная жидкость повторно фильтруется через металлическую сетку. Осажденные на сетке частицы тщательно промываются дистиллятом для удаления остатков соли. После чего осадок смывается на чашку Петри для дальнейшего анализа [4].

Акватория Ладожского озера в целом характеризуется довольно низкими показателями различного рода загрязнений. Наихудшая ситуация наблюдается в прибрежных районах в местах впадения рек, вблизи городских территорий и точечных источников загрязнения [1]. Это частично коррелирует с картиной загрязнения озера частицами микропластика.

Наибольшие концентрации микропластиковых частиц в воде зафиксированы в бухте Питкяранта вблизи целлюлозно-бумажного комбината (353 частицы на м<sup>3</sup>), города Приозерск (160 частиц на м<sup>3</sup>), города Сортавала (144 частиц на м<sup>3</sup>), на реке Свирь вблизи поселка Свирица (158 частиц на м<sup>3</sup>) и в реке Морье, ниже по течению от свалки бытовых отходов (145 частиц на м<sup>3</sup>).

В донных отложениях максимальные концентрации отмечены в реках Волхов (160 частиц/кг) и Нева (145 частиц/кг), а также в бухте Питкяранта (90 частиц/кг).

При этом стоит отметить, что полученные данные не показывают прямую корреляцию концентрации микропластиковых частиц с гранулометрическим составом донных отложений. Вероятнее всего это связано с дополнительным влиянием других факторов загрязнения, формирующих картину распределения частиц микропластика на акватории озера.

По размеру анализируемых микропластиковых частиц, наибольшая часть (60%) приходится на частицы от 0 до 1000 мкм. Далее, с увеличением размера частиц, их количество уменьшается (рис. 1).

По типу частиц, микропластик в Ладожском озере в основном представлен волокнами, но также встречаются фрагменты и пленки. Наличие большого количества пластиковых волокон может быть отчасти обусловлено активным рыболовным промыслом на данной территории. Рыболовные сети – один из значимых источников попадания микропластика в водную среду [5].

Для рыболовных снастей в основном используется полиамид (нейлон) [6]. Исследования, проведенные при помощи Рамановской спектроскопии, подтвердили наличие волокон данного типа, которые в том числе могут быть частями рыболовных сетей.

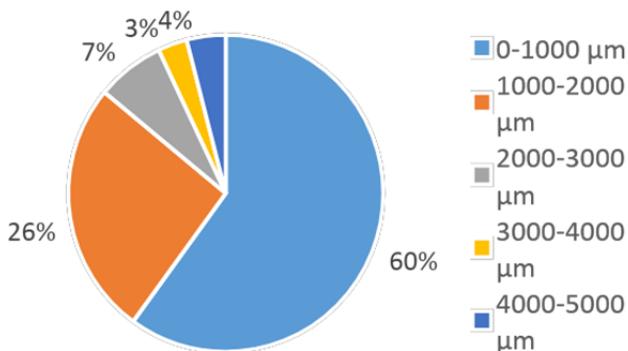


Рис. 1. Распределение частиц микропластика в Ладожском озере по размеру

Спектральный анализ также выявил частицы полиэтилентерефталата, полиэтилена, поликарбоната и в большом количестве целлюлозы.

Исследования загрязнения водных объектов микропластиком позволяют лучше представить механизмы распространения данных частиц в водной толще и донных отложениях. Полученные результаты могут быть полезны в качестве составляющей при формировании общей картины загрязнения частицами микропластика водных объектов Российской Федерации.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН по теме № 0154-2019-0003 «Разработка комплексных методов исследования и оценки характеристик твердых частиц в наномасштабном диапазоне размеров в водных объектах с различной степенью антропогенной нагрузки».*

#### Список источников

1. Румянцев В.А. Ладожское озеро и достопримечательности его побережья. Атлас. СПб. : Нестор-История, 2015. 200 с.
2. Румянцев В.А. Ладожское озеро: экологические проблемы, причины, пути решения // Региональная экология. 2012. № 1–2. С. 7–13.
3. Поздняков Ш.Р., Каретников С.Г., Иванова Е.В., Тихонова Д.А., Лапенков А.Е., Гузева А.В. Опыт использования фильтрационной установки для изучения вертикального распределения микропластика в водной толще // Российский журнал прикладной экологии. 2021. № 4. С. 41–45.
4. Ivanova E.V., Pozdnyakov Sh.R., Tikhonova D.A. Analysis of microplastic concentrations in water and bottom sediments as a new aspect of ecological monitoring // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2021. V. 834. 012057.

5. Andrady A.L. Microplastics in the marine environment // Marine Pollution Bulletin. V. 62. 2011. P. 1596–1605.
6. Marine plastic debris and microplastics: Global lessons and research to inspire action and guide policy change // United Nations Environment Programme, Nairobi. 2016. 252 p. URL: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/7720>.

## THE STUDY OF MICROPLASTIC POLLUTION OF LAKE LADOGA AND ITS TRIBUTARIES

**Sh.R. Pozdnyakov<sup>1</sup>, E.V. Ivanova<sup>2</sup>, D.A. Tikhonova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Institute of continental water bodies, Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia, tbgmaster@mail.ru*

<sup>2</sup> *Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg*

<sup>3</sup> *Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia, spb.spt@mail.ru*

**Abstract.** The analysis of microplastic pollution of Lake Ladoga is an important part of the environmental studies in the region, as the state of the lake directly influences the quality of the water supply of Saint Petersburg. In this study, we analyzed concentrations, shape, size and chemical composition of microplastics in water and sediment samples of Lake Ladoga. The results showed that the highest concentrations of microplastics in the lake and its tributaries were fixed near urban areas, industrial enterprises, landfills, and river inflows.

**Keywords:** microplastics, Lake Ladoga

## ДЕТЕКЦИЯ МИКРОПЛАСТИКА В ЖЕЛУДОЧНО-КИШЕЧНОМ ТРАКТЕ ПРЕСНОВОДНЫХ РЫБ НА ПРИМЕРЕ ОБИТАТЕЛЕЙ РЕЧНОЙ СИСТЕМЫ ОБИ

С.Н. Рахматуллина, Я.Р. Лемешко, Е.Д. Воробьев,  
И.Б. Бабкина, Д.С. Воробьев, Ю.А. Франк

Томский государственный университет, Томск, Россия, svetik\_98\_76@bk.ru

**Аннотация.** Загрязнение окружающей среды частицами микропластика является глобальной экологической проблемой на данном этапе развития человечества. Благодаря низкой скорости разложения, микропластики широко распространены в окружающей среде. Зафиксировано, что в водной среде накопление частиц микропластика идет гораздо быстрее, что обусловлено высокими объемами поступления. Значительное количество микропластика в водных объектах потребляется гидробионтами (рыбы, беспозвоночные и т.д.) и включается в трофические цепи. В данном исследовании произведен сравнительный количественный анализ частиц микропластика в желудочно-кишечном тракте *Perca fluviatilis* L. и *Leuciscus leuciscus* L., из р. Томи. Частицы микропластика встречены у 75% исследованных особей речного окуня и 45% ельцов обыкновенных. Среднее количество частиц составило  $8,48 \pm 8,94$  на особь окуня и  $1,45 \pm 2,39$  на особь ельцов.

**Ключевые слова:** микропластик, пресноводные рыбы, *Perca fluviatilis* L., *Leuciscus leuciscus* L., желудочно-кишечный тракт

Загрязнение окружающей среды микропластиком является глобальной общемировой проблемой [1]. На текущем этапе развития человечества пластиковые материалы используются практически повсеместно в связи с низкой плотностью, низкой теплопроводностью, а также устойчивостью к временному распаду [2]. В мелководных ручьях и реках пластиковые продукты подвергаются воздействию ультрафиолетового излучения, который сильно ослабляет структуру полимеров и вызывает фрагментацию крупных частиц до размеров микропластика [3]. По сравнению с морскими экосистемами микропластик в пресноводной среде изучен слабо [3]. Однако доказан факт проглатывания частиц микропластика различными гидробионтами (позвоночными и беспозвоночными) и его активное включение в трофические цепи [2]. Так как рыбный промысел на территории Западной Сибири, в

частности в Томской области, является важным ресурсом для питания местного населения, то накопление частиц микропластика в желудочно-кишечном тракте рыб может иметь отдаленные последствия для здоровья человека.

Цель исследования – оценка потребления и аккумуляции микропластика пресноводными рыбами. В задачи настоящей работы входили: определение количества микропластика в желудочно-кишечном тракте речного окуня и ельца обыкновенного, а также сравнительный анализ взаимосвязи накопления микропластика и биологических характеристик в рыбах двух видов.

Материалами для исследования служили желудочно-кишечные тракты (ЖКТ) речного окуня и ельца обыкновенного, отловленных рыбаками в 2021 г. в районе лодочной станции р. Томи (правый приток р. Оби). Рыб препарировали в чистом металлическом лотке и делали биометрические замеры. Были измерены общая длина тела ( $L$ , мм) каждой особи и общая масса тела ( $Q$ , г). После этого измеряли стандартную длину тела ( $l$ , мм), массу тела без внутренностей ( $q$ , г), а также определяли пол (женский, мужской) каждой особи с помощью осмотра гонад. Желудочно-кишечный тракт (ЖКТ), включая пищевод, желудок и кишечник, помещали в чистые пробирки и замораживали до последующего анализа. Каждый экземпляр был проанализирован отдельно, в общей сложности в ходе работы исследовано 20 особей окуня речного и 20 особей ельца обыкновенного.

Гидролиз ЖКТ проводили индивидуально для каждой особи в 200 мл раствора КОН (10%). После растворения тканей частицы микропластика извлекали путем разделения по плотности в насыщенном растворе NaCl ( $1,19 \text{ г/см}^3$ ). Полученный раствор фильтровали под вакуумом через фильтр из модифицированной целлюлозы с диаметром пор 0,45 мкм и проводили микроскопическое исследование. Частицы микропластика были идентифицированы визуальным способом в соответствии с правилами, установленными ранее [4]: однородность окраски, отсутствие структур органического происхождения, особенности изгиба волокон, устойчивость к механическому разрыву. Для оценки физических свойств частиц применяли тест горячей иглой. Основными критериями для классификации частиц служили их размер и форма, поэтому в ходе исследования выявляли полимерные фрагменты неправильной формы, волокна, сферы и пленки.

В ходе исследования были изучены в общей сложности 40 особей рыб: 27 из них самки, 14 – самцы (данные не показаны). Частицы микропластика были обнаружены в ЖКТ 15 особей речного окуня и в

9 особях ельцов обыкновенных, что составляет 75% выборки для окуней и 45% для ельцов. Результаты работы подтверждают полученные ранее данные о потреблении ельцами микропластика в притоке реки Оби [5]. Частицы микропластика представлены преимущественно волокнами, реже встречаются микрофрагменты нерегулярной формы и микропенки (рис. 1). Микросферы в исследованных образцах не обнаружены, хотя в воде р. Томи они ранее были зафиксированы [6].

Среднее количество частиц составило  $8,48 \pm 8,94$  на особь одного окуня и  $1,45 \pm 2,39$  на одного ельца, с разбросом от 0 до 20 частиц (таблица). Анализ накопления микропластика в ЖКТ самцов и самок с помощью критерия Манна–Уитни не выявил статистически значимых отличий между полами ( $p < 0,05$ ). Полученное эмпирическое значение  $t(0,1)$  находится в зоне незначимости.

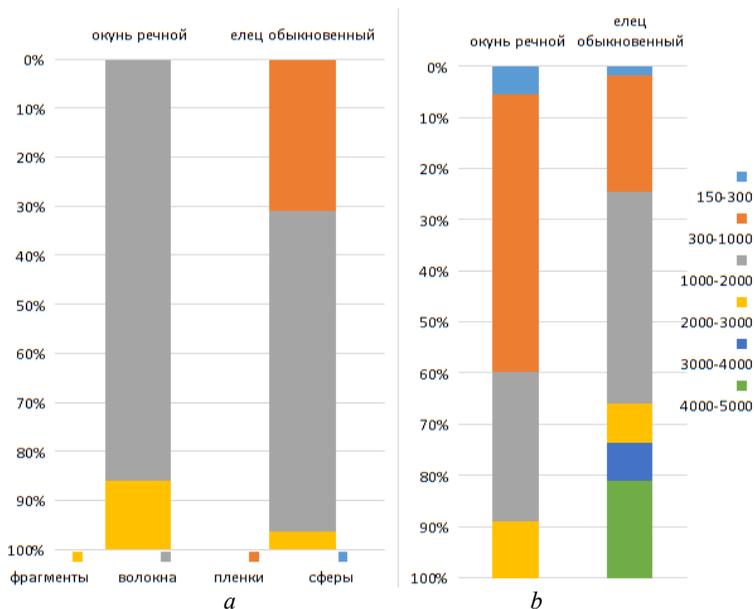


Рис. 1. Морфология микропластика из ЖКТ рыб реки Томи: процентное соотношение частиц разной формы (a) и разного размера (b)

Выявлена умеренная корреляция между биологическими показателями ( $L, l, Q, q$ ) и содержанием микропластика в ЖКТ речного окуня – коэффициент корреляции Пирсона ( $r$ ) составил от 0,37 до 0,40. Для ельцов обыкновенных такой закономерности не наблюдалось, что, ве-

роятнее всего, связано с особенностями питания и экологических особенностей их жизнедеятельности.

**Биологические характеристики *Perca fluviatilis* L. и *Leuciscus leuciscus* L. из р. Томи и содержание микропластика в ЖКТ**

Вид	L, мм	l, мм	Q, г	q, г	МП на особь	МП на кг
Окунь	150±8,25	126±7,32	36,9±5,65	33,6±5,02	8,48±8,96	429 ±985
Елец	168 ±10,32	138±8,58	42,2±8,29	36,6±7,27	0,60±0,54	70,5±71,5

Таким образом, в ходе исследования микропластика в ЖКТ *Perca fluviatilis* L. и *Leuciscus leuciscus* L. из р. Томи, правого притока Оби, частицы обнаружены у 75% особей окуня речного и 45% ельца обыкновенного. Среднее количество частиц составило  $8,48 \pm 8,94$  на одного окуня и  $1,45 \pm 2,39$  на одного ельца, с разбросом от 0 до 20 частиц. Поглощение микропластика умеренно связано с линейно-весовыми характеристиками рыб для окуней. Для ельцов подобной зависимости не выявлено. В ЖКТ исследованных рыб обнаружены микрофрагменты, микроволокна и микропленки искусственных полимеров. Полимерный состав обнаруженного микропластика предстоит выяснить с использованием спектроскопического анализа для уточнения его происхождения.

*Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).*

**Список источников**

1. Rochman C.M., Hoellein T. The global odyssey of plastic pollution. Thinking big about small particles reveals new features of the microplastic cycle // Science. 2020. V. 368. P. 1184–1185.
2. Andrady A.L. The plastic in microplastics: a review // Marine Pollution Bulletin. 2017. V. 119. P. 12–22.
3. Skalska K., Ockelford A., Ebdon J.E., Cundy A.B. Riverine microplastics: Behaviour, spatio-temporal variability, and recommendations for standardised sampling and monitoring // Journal of Water Process Engineering. 2020. V. 38. 101600.
4. Hidalgo-Ruz V., Gutow L., Thompson R.C., Thiel M. Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification // Environ Sci Technol. 2012. V. 46. P. 3060–3075.

5. Frank Y.A., Vorobiev E.D., Babkina I.B., Antsiferov D.V., Vorobiev D.S. Microplastics in fish gut, first records from the Tom River in West Siberia, Russia // *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta*. 2020. V. 52. P. 130–139.
6. Frank Y.A., Vorobiev E.D., Vorobiev D.S., Trifonov A.A., Antsiferov D.V., Soliman H.T., Wilson S.P., Strezov V. Preliminary screening for microplastic concentrations in the surface water of the Ob and Tom rivers in Siberia, Russia // *Sustainability*. 2021. V. 13. 80.

**DETECTION OF MICROPLASTICS  
IN THE GASTROINTESTINAL TRACT OF FRESHWATER FISH:  
EXAMPLE OF THE OB RIVER SYSTEM INHABITANTS**

**S.N. Rakhmatullina, Y.R. Lemeshko, E.D. Vorobiev, I.B. Babkina,  
D.S. Vorobiev, Y.A. Frank**

*Tomsk State University, Tomsk, Russia, svetik\_98\_76@bk.ru*

**Abstract.** Environmental pollution by microplastic (MP) particles is a global environmental problem at the current stage of civilization. Due to the low rate of decomposition, plastic microparticles are widely distributed in the environment. It is recorded that the accumulation of MPs in the aquatic environment is much faster, which is due to high production volumes. A significant amount of MPs in water bodies is consumed by hydrobionts (fish, invertebrates, etc.) and is included in trophic chains. In this study, a comparative quantitative analysis of MP content in the gastrointestinal tracts of *Perca fluviatilis* L. and *Leuciscus leuciscus* L., from the Tom River, was performed. MPs were found in 75% of the studied individuals of river perch and 45% of common dace. The average number of particles was  $8.48 \pm 8.94$  per perch individual and  $1.45 \pm 2.39$  per dace individual.

**Keywords:** microplastics, freshwater fish, *Perca fluviatilis* L., *Leuciscus leuciscus* L., gastrointestinal tract

## ЭКСПРЕСС-ИДЕНТИФИКАЦИЯ МИКРОПЛАСТИКА В ФИБРОБЛАСТАХ ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ УСИЛЕННОЙ ТЕМНОПОЛЬНОЙ МИКРОСКОПИИ И ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ

**И.Р. Ишмухаметов, С.Н. Баташева, Г.И. Фахруллина,  
Р.Ф. Фахруллин**

*Казанский (Приволжский) федеральный университет,  
Казань, Россия, irishmukhametov@gmail.com*

**Аннотация.** Неконтролируемое распространение микропластика требует разработки современных и высокопроизводительных способов их идентификации в биологических объектах. В работе описана методология сегментации и классификации микрочастиц полистирола в фибробластах человека, основанная на применении продвинутой техники микроскопии и алгоритмов глубокого обучения. Предложенный подход исключает необходимость дополнительной гиперспектральной съемки образцов для идентификации частиц по спектрам, сохраняя сопоставимую точность классификации.

**Ключевые слова:** полистирол, микроскопия темного поля, фибробласты кожи человека, сверточная нейронная сеть, гиперспектральная микроскопия

Обильное производство и нерегулируемое использование пластмасс, включая одноразовые изделия, в течение последних нескольких десятилетий привело к серьезному загрязнению окружающей среды пластиковыми отходами [1]. При этом крупные частицы пластика разрушаются под воздействием природных или антропогенных факторов, что приводит к образованию более мелких частиц, называемых вторичным микропластиком [2, 3]. В то же время первичный микропластик вроде гранул в абразивных чистящих средствах для лица или микроволокон одежды, который изначально производится в микрометровом размере, также попадает в окружающую среду [4]. Таким образом, с учетом широкого применения синтетических материалов, считается, что все биотопы подвержены постоянному и возрастающему накоплению микроразмерной пластмассой [5]. Повсеместное загрязнение микродисперсными частицами обуславливает необходимость тщательной оценки их воздействия на биологические объекты [6]. Перспективным подходом для быстрой визуализации субмикрон-

ных материалов является усиленная темнопольная микроскопия (УТМ), позволяющая, без необходимости тщательной пробоподготовки, исследовать распределение нано- и микрочастиц в клетках и небольших многоклеточных организмах. Однако, в настоящий момент, для осуществления комплексного количественного анализа биораспределения наноматериалов, УТМ используется в сочетании с методом гиперспектральной визуализации и последующего спектрального картирования, что может снижать применимость данного подхода в исследованиях, где временной фактор является критичным. В данной работе предложен метод экспресс-идентификации частиц микропластика в водной среде и биологических объектах на основе техники усиленной темнопольной микроскопии и модели сверточной нейронной сети.

Определение микрочастиц в клетках млекопитающих осуществлялось с применением трех типов сферических полистирольных гранул с диаметром 1 мкм, различающихся пигментацией: бесцветные, синие и красные. Оценка жизнеспособности фибробластов кожи человека после 24-часовой инкубации с полистирольными частицами в концентрации 1–10 мкг/мл проводилась с применением колориметрического МТТ-теста. Визуализация частиц в растворе и в клетках после 24-часовой инкубации с образцами осуществлялась с использованием УТМ, дополненной гиперспектральной съемкой в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне (400–1000 нм). В ходе микроскопии частиц в растворе и клетках были собраны массивы данных, состоящие из пар темнопольных и гиперспектральных снимков для применения в последующем нейросетевом анализе. Далее, для получения набора снимков, состоящего из единичных частиц, все изображения были сегментированы с использованием подобранного протокола предварительной обработки по методу Оцу в CellProfiler 4.0.5 [7]. Полученные 11000 изображений частиц в растворе, разделенные на три группы в соответствии с типом пигментации, были использованы для обучения остаточной нейронной сети, состоящей из 46 двумерных сверточных слоев. Итоговая модель нейронной сети с точностью равной 99,1% была затем использована для классификации смеси трех групп частиц в растворе и клетках. Эффективность и скорость классификации частиц с использованием разработанного протокола была сопоставлена с традиционным методом анализа материалов. Для этого гиперспектральные изображения из пар снимков были проанализированы посредством алгоритма картирования по спектральному углу (максимальный угол – 0,1 радиан).

В результате анализ пролиферативной активности фибробластов человека после инкубации с полистирольными частицами показал значимое снижение жизнеспособности клеток ( $79\pm 13\%$ ) лишь при концентрации раствора равной 10 мкг/мл. Последующее исследование распределения частиц в клетках подтвердило как прикрепление частиц к мембране, так и их проникновение внутрь фибробластов. Сегментация темнопольных изображений, полученных при микроскопии, позволила собрать набор данных для обучения остаточной нейронной сети. Точность классификации модели нейронной сети на группе снимков смеси частиц в растворе и клетках, относительно картирования по спектральному углу, составила 90 и 93%, соответственно. Общее время сегментации и классификации частиц с 20 снимков темного поля составило 400 с, из которых всего 10 с затрачивается на классификацию изображений. В случае с алгоритмом картирования по спектральному углу, время классификации одного гиперспектрального снимка составляет 4–6 с, при этом на его съемку затрачивается дополнительно 7–10 минут. Таким образом, нами предложена методология обработки и классификации микропластика в биологических объектах с использованием алгоритмов глубокого обучения, превосходящая по скорости традиционный метод анализа, но сохраняющая при этом сопоставимую точность идентификации.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 21-73-00097).*

#### **Список источников**

1. Allen S., Allen D., Phoenix V.R., Le Roux G., Durántez J. P., Simonneau A., Binet S., Galop D. Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment // Nat. Geosci. 2019. V. 12. P. 339–344.
2. Efimova I., Bagaeva M., Bagaev A., Kileso A., Chubarenko I.P. Secondary microplastics generation in the sea swash zone with coarse bottom sediments: laboratory experiments // Front. Mar. Sci. 2018. V. 5.
3. Kole P.J., Löhr A.J., Van Belleghem F., Ragas A. Wear and tear of tyres: a stealthy source of microplastics in the environment // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2017. V. 14. 1265.
4. Cheung P.K., Fok L. Evidence of microbeads from personal care product contaminating the sea // Mar. Pollut. Bull. 2016. V. 109. P. 582–585.
5. Katyal D., Kong E., Villanueva J. Microplastics in the environment: impact on human health and future mitigation strategies // Environ. Heal. Rev. 2020. V. 63. P. 27–31.
6. Rozman U., Kalčíková G. Seeking for a perfect (non-spherical) microplastic particle – the most comprehensive review on microplastic laboratory research // J. Hazard. Mater. 2022. V. 424. 127529.

7. McQuin C., Goodman A., Chernyshev V., Kamensky L., Cimini B.A., Karhohs K.W., Doan M., Ding L., Rafelski S.M., Thirstrup D., Wiegraabe W., Singh S., Becker T., Caicedo J.C., Carpenter A.E. CellProfiler 3.0: next-generation image processing for biology // PLOS Biol. 2018. V. 16. e2005970.

**EXPRESS IDENTIFICATION OF MICROPLASTICS  
IN HUMAN FIBROBLASTS BASED ON ENHANCED DARKFIELD  
MICROSCOPY AND DEEP LEARNING**

**I.R. Ishmukhametov, S.N. Batasheva, G.I. Fakhrullina, R.F. Fakhrullin**

*Kazan Federal University, Kazan, Russia, irishmukhametov@gmail.com*

**Abstract.** The uncontrolled distribution of microplastics requires the development of modern and high-throughput methods for their identification in biological objects. The paper describes a methodology for the segmentation and classification of polystyrene microparticles in human fibroblasts based on advanced microscopy techniques and deep learning algorithms. The proposed approach eliminates the need for additional hyperspectral imaging of samples to identify particles by spectra while maintaining comparable classification accuracy.

**Keywords:** polystyrene, darkfield microscopy, human skin fibroblasts, convolutional neural network, hyperspectral microscopy

## МИКРОПЛАСТИК КАК ФАКТОР РИСКА ДЛЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АРКТИЧЕСКИХ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ И ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ ЧЕЛОВЕКА

А.Н. Кизеев, С.А. Сюрин

*Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья,  
Санкт-Петербург, Россия, a.kizeev@s-znc.ru*

**Аннотация.** В работе представлен анализ данных научной литературы о потенциальных рисках микрочастиц синтетических полимеров (микропластика) арктическим водным экосистемам и здоровью человека. Подробно изучены публикации, индексируемые в отечественных и международных библиографических базах. Проведенный анализ научных работ позволит систематизировать и обобщить результаты исследований о потенциальных рисках микропластика водным экосистемам и здоровью человека, что послужит основой для реализации собственных исследований в арктических районах.

**Ключевые слова:** микропластик, водные экосистемы, здоровье человека, Арктика

XX и XXI вв. – время внедрения в жизнь синтетических полимеров. Физико-химические свойства пластиков, обеспечивающие прочность, легкость и долговечность, в сочетании с низкой себестоимостью, делают этот материал практически незаменимым при производстве широкого круга изделий промышленного и бытового назначения. Мировое производство пластмасс увеличилось с 2,3 млн т в 1950 г. до 448 млн т к 2015 г. По прогнозам, к 2050 г. эта цифра удвоится [1]. Однако, масштабы утилизации и переработки пластиков несоизмеримо ниже. После истечения срока эксплуатации 9% пластика уходит на переработку, 12% – сжигается с целью извлечения энергии, 8% – складывается на свалках, а 71% – выбрасывается [2]. Пластиковые изделия, попадающие в природные условия, с течением времени деградируют и измельчаются, порождая огромное количество микро- ( $\leq 5$  мм) и нано- ( $\leq 100$  нм) частиц, представляющих серьезную опасность для среды обитания человека [3]. Термин «микропластик» впервые появился в научной статье в журнале Science в 2004 г. [4]. Как правило, микропластик состоит из разных типов пластиков: полиэтилена, полипропилена, полистирола, поливинилхлорида и различается по размеру, удельной плотности, форме [2].

Цель работы – анализ и систематизация данных научной литературы о потенциальных рисках микропластика арктическим водным экосистемам и здоровью человека.

Арктические районы особенно уязвимы к антропогенному воздействию [5]. Моря Северного Ледовитого океана служат местом стока крупных Северо-Европейских и сибирских рек (Печора, Северная Двина, Обь, Лена, Енисей и др.), воды которых несут в себе частицы пластика вместе с промышленными и бытовыми стоками. В Арктику поступает значительное количество пластиковых частиц с ветвями атлантических течений от густонаселенных районов Европы и Америки, вследствие чего восточная часть Баренцева моря может с течением времени стать одним из морских «мусорных пятен» на планете. Не следует исключать поступление в арктические моря пластика и с тихоокеанскими течениями. Северный Ледовитый океан к настоящему времени загрязнен более чем 300 млрд частиц микропластика, который был обнаружен даже в арктическом льду [6, 7].

Биомониторинговые исследования, проведенные учеными в различные годы, показали накопление частиц микропластика в донных отложениях, морской воде, а также в большом разнообразии живых организмов – ракообразных, рыб, моллюсков, мидий, морских огурцов, амфипод, птиц. Многие животные либо проглатывают пластик, принимая его за пищу, либо запугиваются в нем, что ставит жизнь этих организмов под угрозу. Частицы пластика могут также играть роль искусственного субстрата, на поверхности которого оседают различные организмы-обитатели, способные перемещаться водными течениями на большие расстояния, создавая угрозу экологических инвазий различных видов гидробионтов. Существует понятие «пластисфера» – новая экологическая ниша, появившаяся в результате притока пластикового мусора в водоемы. Вторжение заносных видов, как правило, оборачивается гибелью местного биологического разнообразия [2, 6–8].

Присутствующий в Арктике микропластик включается в пищевые цепи. Находящиеся в водоемах пластиковые частицы поедаются сначала зоопланктонными организмами, которыми, в свою очередь, питаются рыбы. Двустворчатые моллюски интенсивно отфильтровывают пластик, перенося его далее по пищевой цепи. Отмечено накопление микропластика в рыбе и в ракообразных, выловленных в Гренландском море и у побережья архипелага Шпицберген [7]. Большинство исследований микропластика касается морской ихтиофауны, в то время как на пресноводную обращено гораздо меньшее внимание. Впер-

вые в России данной проблемой заинтересовались ученые из Центра исследования микропластика в окружающей среде Биологического института Томского государственного университета, которые в рамках проекта по изучению загрязненности Оби и ее притоков установили присутствие значительного количества микрочастиц синтетических полимеров (размером от  $<0,15$  до  $2,00$  мм) в пищеварительном тракте ельца, выловленного из р. Томь [9].

Частицы микропластика способны адсорбировать на своей поверхности различные поллютанты, становясь тем самым их вторичным источником. На пластиковых предметах, обнаружены стойкие органические загрязнители в концентрациях, на несколько порядков превышающих их содержание в воде [8]. Данные загрязнители, продвигаясь вверх по пищевой цепи вместе с микропластиком, могут концентрироваться как в высших хищниках, так и в организме человека, отражаясь на его здоровье. Частицы микропластика обнаруживаются в организмах до 90% обследованных людей. Отмечено, что люди, регулярно питающиеся морепродуктами или постоянно употребляющие бутилированную питьевую воду, ежегодно получают десятки тысяч мельчайших кусочков пластика [3]. Недавние исследования, проведенные учеными из Нидерландов, показали наличие микрочастиц полиэтилентерефталата, полистирола, полиэтилена и оргстекла в образцах крови, взятой на анализ у 17 из 22 человек. При этом было отмечено, что частицы микропластика способны перемещаться с кровотоком и оседать в жизненно важных человеческих органах [10]. Характер наносимых повреждений частицами пластика до конца не ясен; исследователи указывают на нарушение клеточного метаболизма, воспалительные процессы, тромбообразование, канцерогенные эффекты и др. [2, 8, 11, 12]. Уровень загрязнения (ПДК) для микропластика до сих пор остается не регламентированным [12].

Проанализированные в работе данные научной литературы позволили систематизировать и обобщить результаты исследований о потенциальных рисках микропластика водным экосистемам и здоровью человека, что в свою очередь, будет являться основой для разработки и реализации программы собственных научных исследований в арктических районах.

#### Список источников

1. Пластиковый мусор и микропластик в Мировом океане. Глобальное предостережение и исследование, призыв к действиям и руководство по изменению направления политики. ЮНЕП: Найроби, 2016. 189 с.

2. Сапрыкин А.И., Самойлов П.П. Микро- и нанопластики в окружающей среде (аналитика, источники, распределение и проблемы экологии): аналитический обзор. Новосибирск : ГПИТБ СО РАН, 2021. 115 с.
3. Рудаков О.Б., Рудакова А.В. Наночастицы из пластика – актуальный контаминант пищевой продукции // Мясные технологии. 2019. № 10. С. 26–29.
4. Thompson R.C., Olsen Y., Mitchell R.P., Davis A., Rowland S.J., John A.W., McGonigle D., Russell A.E. Lost at sea: where is all the plastic? // Science. 2004. V. 304. 838.
5. Матишов Г.Г., Денисов В.В., Дженюк С.Л., Макаревич П.Р. Большие морские экосистемы шельфовых морей российской Арктики // Наземные и морские экосистемы. Мурманск : Паулсен, 2011. С. 71–97.
6. Ершова А.А., Еремина Т.Р., Дунаев А.Л., Макеева И.Н., Татаренко Ю.А. Исследование загрязнения микропластиком морей российской Арктики и Дальнего Востока // Арктика: экология и экономика. 2021. № 11. С. 164–177.
7. Зайков К.С., Соболев Н.А. Загрязнение морским мусором западного сектора российской Арктики // Арктика и Север. 2021. № 43. С. 246–252.
8. Масленников С.И., Щукина Г.Ф., Назарец Ю.П. Микропластик в океане – новые проблемы морского природопользования // Рыбное хозяйство. 2017. № 3. С. 20–24.
9. Frank Y.A., Vorobiev E.D., Babkina I.B., Antsiferov D.V., Vorobiev D.S. Microplastics in fish gut, first records from the Tom River in West Siberia, Russia // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2020. № 52. С. 130–139.
10. Leslie H.A., van Velzen M.J.M., Brandsma S.H., Vethaak A.D., Garcia-Vallejo J.J., Lamoree M.H. Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood // Environment International. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107199>
11. Yee M.S.-L., Hii L.W., Looi C.K., Lim W.-M., Wong S.-F., Kok Y.-Y., Tan B.-K., Wong C.-Y., Leong C.-O. Impact of microplastics and nanoplastics on human health // Nanomaterials. 2021. V. 11. 496.
12. Саванина Я.В., Барский Е.Л., Фомина И.А., Лобакова Е.С. Загрязнение водной среды микропластиком: воздействие на биологические объекты, очистка // Информационные технологии в науке, образовании и управлении. 2019. № 2. С. 54–58.

# **MICROPLASTICS AS A RISK FACTOR FOR THE FUNCTIONING OF ARCTIC AQUATIC ECOSYSTEMS AND FOR HUMAN HEALTH**

**A.N. Kizeev, S.A. Syurin**

*North-West Public Health Research Center, St. Petersburg, Russia,  
a.kizeev@s-znc.ru*

**Abstract.** In this work an analysis of scientific literature data on the potential risks of microplastics to Arctic aquatic ecosystems and human health was conducted. The publications indexed in domestic and international bibliographic databases have been studied in detail. The analysis of scientific papers will allow to systematize and summarize the results of research on the potential risks of microplastics to aquatic ecosystems and human health, which will serve as a basis for the implementation of their own research in the Arctic regions.

**Keywords:** microplastics, aquatic ecosystems, human health, Arctic

## СОДЕРЖАНИЕ МИКРОПЛАСТИКА В АБИОТИЧЕСКИХ И БИОТИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТАХ МЕШИНСКОГО ЗАЛИВА (РЕСПУБЛИКА ТАТАРСТАН)

Н.Ю. Степанова, К.А. Шевчук, Л.С. Кузьмин, А.Р. Гайсин

*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия,  
nstepanova.kazan96@gmail.com*

**Аннотация.** Проведено исследование содержания микропластика в воде, донных отложениях, жабрах и желудочно-кишечном тракте леща (*Abramis brama*) в устье реки Меша, правом притоке реки Кама. Показано наличие микропластика в воде на уровне  $31,5 \pm 20,3$  ед./м<sup>3</sup>, в донных отложениях  $55,5 \pm 43,1$  ед./кг, в жабрах рыбы  $3,0 \pm 2,9$  ед./экз, в желудочно-кишечном тракте  $7,8 \pm 6,6$  ед./экз. Во всех исследованных образцах преобладали нити длиной 739–971 мкм.

**Ключевые слова:** микропластик, вода, донные отложения, лещ

В мире производство пластика постоянно увеличивается, например в 2018 г. было произведено около 359 млн т пластика [1]. По опубликованным данным [1] примерно 6 300 млн т пластиковых отходов было произведено с 1950 по 2015 г., часть которых в конечном счете поступила в окружающую среду, где пластик фрагментируется до микрочастиц под воздействием физико-химических факторов.

За счет малого размера микропластик (МП) легко заглатывается животными и перемещается по пищевой цепи в организмы более высокого трофического уровня, включая человека [2]. МП оказывает не только физическое воздействие на организм, вызывая угнетение роста и развития, но представляет токсическую опасность, так как 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 водоохранной зоне. В отечественной литературе основная часть публикаций посвящена исследованию МП в морских экосистемах и недостаточно изучено содержание МП в реках и озерах [2].

Целью работы было оценить содержание МП в воде, донных отложениях и рыбе реки Меша.

Река Меша – правый приток Камы, впадает в Камский залив Куйбышевского водохранилища. Длина реки 204 км, ширина колеблется от 30 м до 2–3 км. Скорость течения примерно 1–2 м/с. Глубина реки 0,2–0,6 м. Площадь бассейна 4 180 км<sup>2</sup> [3, 4], испытывает антропогенную нагрузку со стороны сельскохозяйственных и коммунальных предприятий.

Отбор проб производили в мае 2021 г. (рис. 1). Воду объемом 100 л пропускали через планктонную сеть (размер отверстия 120 мкм) с объемом стакана 100 мл, донные отложения отбирали штанговым дночерпателем ГР-91, рыбу (лещ *Abramis brama*) в количестве 5 штук возраста 6–7 лет, с массой 1044±54 г, длиной 34,9±0,8 см.

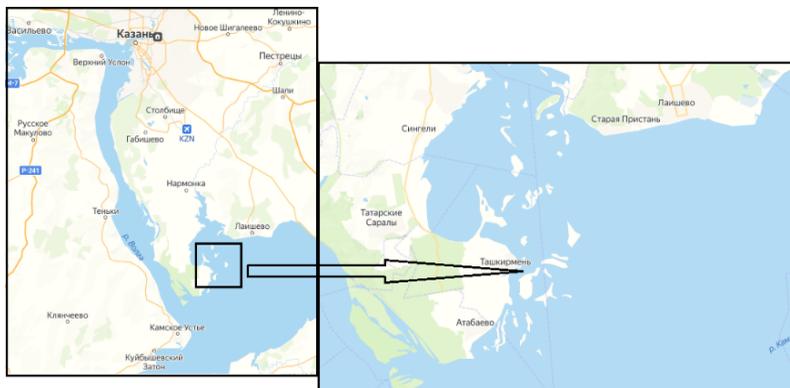


Рис. 1. Карта-схема района исследования

Общее количество отобранных проб: воды – 20 шт., донных отложений – 8 шт., рыбы – 5 шт. Подготовку проб воды и донных отложений проводили по [5]. У каждого экземпляра рыбы выделяли жабры и желудочно-кишечный тракт (ЖКТ), взвешивали, заливали 10% раствором КОН в соотношении 1:20 по сырому весу и выдерживали на водяной бане при  $t = 40^{\circ}\text{C}$  в течение 48 часов [6]. Раствор с ЖКТ и с жабрами фильтровали последовательно через металлическое сито с размером ячеек 2 мм и 120 мкм, промывали 70% раствором этилового спирта для удаления жира. Частицы МП идентифицировали под микроскопом, размер определяли при помощи окуляр-микрометра.

Анализ полученных данных показал, что МП был обнаружен во всех средах. В воде частицы МП присутствовали в 65% проб воды, встречаемость в среднем составила  $31,5 \pm 20,3$  ед./м<sup>3</sup>, со средним размером частиц по длине  $971,6 \pm 953,3$  мкм. Чаше встречались частицы МП

размером более 500 мкм – 65%. Масса частиц, рассчитанная основываясь на отмеченной в литературе [7] зависимости между площадью и массой МП, в среднем составила  $506 \pm 555$  мкг/ м<sup>3</sup> (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

**Встречаемость, масса и длина частиц МП в воде, донных отложениях, жабрах и ЖКТ рыбы**

Вид пробы	Встречаемость		Масса, мкг		Длина, мкм	
	Среднее	СКО	Среднее	СКО	Среднее	СКО
Вода	31,5	20,3	506	555	971,6	953,3
Донные отложения	55,5	43,1	613,8	237,2	739,7	551,8
Рыба Ж	3	2,9	484,9	306,6	824,7	575,8
Рыба ЖКТ	7,8	6,6	517,1	669,3	739,6	524,6

В донных отложениях встречаемость была несколько выше, чем в воде и в среднем составила  $55,5 \pm 43,1$  ед./кг, длина в среднем  $739,7 \pm 551,8$  мкм с преобладанием частиц более 500 мкм – 56%, со средней массой  $613,8 \pm 237,2$  мкг/кг.

И в воде, и в донных отложениях преобладали нити (табл. 2) бесцветные (вода), красного и синего цвета (донные отложения).

Т а б л и ц а 2

**Распределение частиц МП в воде, донных отложениях, жабрах, ЖКТ рыбы по форме и цвету**

Вид пробы	Распределение по форме, %				Распределение по цвету, %						
	Нити	Фрагмент	Гранула	Пленка	Бесцветн	Красный	Синий	Зеленый	Фиолетов	Оранжев	Розовый
Вода	60,2	4,8	0	0	53,2	7,4	28,8	6,9	3,7	0	0
Донные отложения	54,6	0	44	1,4	0	42,7	52,7	0	0	4,6	0
Рыба Ж	85	0	0	15	43,6	7,1	45,7	0	0	0	3,6
Рыба ЖКТ	67,2	12,3	20,5	0	73,8	3,1	23,1	0	0	0	0

В жабрах рыбы встречаемость МП была несколько ниже по сравнению с ЖКТ ( $3,0 \pm 2,9$  и  $7,8 \pm 6,6$  соответственно). Жабры задерживали

на своей поверхности в основном нити (85%), а в ЖКТ были обнаружены практически все виды МП с аналогичным цветовым спектром, что и МП в воде (табл. 2).

Если сравнивать полученные данные по встречаемости МП в абиотических и биотических средах с литературными данными, то можно сделать вывод, что они соответствуют низкому уровню. Анализ проб воды из 168 рек по всему миру показал, что содержание МП в воде составляет в среднем 11 128 ед./м<sup>3</sup>, в донных отложениях из 96 рек в среднем содержалось 1 161 ед./кг [8, 9]. Однако загрязнение рек варьирует в зависимости от места отбора проб: от значений, близких к нулю, до тысяч единиц на единицу массы или объема [8, 9].

Однако следует отметить, что МП в устье реки Мешы присутствует во всех средах (вода, донные отложения), а также в тканях и органах рыб.

#### Список источников

1. Ma et al. High levels of microplastic pollution in aquaculture water of fish ponds in the Pearl River Estuary of Guangzhou, China // *Science of the Total Environment*. 2020. V. 744. 140679.
2. Никитин О.В., Латыпова В.З., Миннегулова Л.М., Насырова Э.И. Загрязнение пресных вод микропластиком: необходимость мониторинга и контроля // *Химия и инженерная экология*. 2019. С. 154–160.
3. Онлайн-энциклопедия Tatarica. URL: <https://tatarica.org/ru/razdely/priroda/gidrograficheskaya-set/reki/myosha>.
4. Онлайн-энциклопедия. URL: <https://www.wikiwand.com/ru/Меша>.
5. Зобков М.Б., Есюкова Е.Е. Микропластик в морской среде: обзор методов отбора, подготовки и анализа проб воды, донных отложений и береговых наносов // *Океанология*. 2017. № 1. С. 149–157.
6. Santana M.F.M. et al. Ingestion and depuration of microplastics by a planktivorous coral reef fish, pomacentrus amboinensis // *Frontiers in Environmental Science*. 2021. V. 9. 641135.
7. Mukhanov V.S. A new method for analyzing microplastic particle size distribution in marine environmental samples // *Ecologica Montenegrina*. 2019. V. 23. P. 77–86.
8. Gallitelli L. et al. Transport and deposition of microplastics and mesoplastics along the river course: a case study of a small river in Central Italy // *Hydrology*. 2020. V. 7. 90.
9. Cera A. et al. Microplastics in freshwater: what are the news from the world? // *Diversity*. 2020. V. 12. 276.

## MICROPLASTIC CONTENT IN ABIOTIC AND BIOTIC COMPONENTS OF THE MESHINSKY BAY (REPUBLIC OF TATARSTAN)

N.Yu. Stepanova, K.A. Shevchuk, L.S. Kuzmin, A.R. Gaisin

*Kazan Federal University, Kazan, Russia, nstepanova.kazan96@gmail.com*

**Abstract.** The article presents results of investigation 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. The presence of microplastics in water at the level of  $31.5 \pm 20.3$  particles/m<sup>3</sup>, in sediments  $55.5 \pm 43.1$  particles/kg, in fish gills  $3.0 \pm 2.9$  particles/ex, in the gastrointestinal tract  $7.8 \pm 6.6$  particles/ex. Fibers of 739-971  $\mu$ m in length predominated in all the samples studied.

**Keywords:** microplastics, water, sediments, bream

## ПОЧЕМУ В ЗАРОСЛЯХ МАКРОФИТОВ МНОГО МИКРОПЛАСТИКА: ДЕЙСТВУЮЩИЕ МЕХАНИЗМЫ

**В.Д. Казмирук**

*ФГБУН Институт водных проблем РАН, Москва, Россия, kazm@iwp.ru*

**Аннотация.** Обнаружено 12 механизмов, в результате которых зоны из макрофитов способны эффективно задерживать пластиковые микрочастицы. Основные механизмы: появление дополнительных сопротивлений перемещению водных и воздушных масс, изменение кинематической структуры потоков воды и воздуха, гашение кинетической энергии ветровых волн и дождевых капель, механическое задержание микрочастиц ситоподобными структурами из переплетений стеблей и листьев, адгезия поверхностей растений и микрочастиц, усиливаемая липкими поверхностями перифитона, взаимодействие электрических полей.

**Ключевые слова:** микропластик, макрофиты, механизмы, задержание микрочастиц

Недавние исследования показали, что макрофиты и в целом зарастающие зоны могут задерживать значительное количество пластиковых микрочастиц [1–3]. Макрофиты, занимающие часть водной толщи или всю водную толщу, формируют особые условия движения воды в этой области и ее окрестностях. Растительность создает дополнительные гидравлические сопротивления, чем усиливает гашение кинетической энергии потока, способствует снижению скоростей движения воды и ее транспортирующей способности, уменьшению интенсивности турбулентного перемешивания, трансформации и затуханию ветровых волн. Водообмен на зарастающих участках уменьшается на 1–2 порядка.

Снижение водообмена и в целом гидродинамической активности водных масс происходит также за счет снижения скорости ветра у поверхности воды на участках, заросших жесткой воздушно-водной растительностью. На таких участках скорость ветра уменьшается в 6–10 раз по сравнению с аналогичными открытыми участками. Развитию турбулентного перемешивания от ветрового воздействия препятствует и погруженная растительность, верхушки которой находятся над водой, а также растения с плавающими по поверхности воды листьями.

Поток, обтекающий растения, имеет сложную кинематическую структуру. По-разному происходит обтекание погруженной и воздушно-водной растительности. Перед растениями возникает подпор водной поверхности, который может иметь как общий, так и локальный характер. В тыльной части растений по отношению к набегающему потоку формируются водоворотные зоны, где накапливаются захваченные микрочастицы. Ширина этих зон примерно равна ширине препятствия, а длина примерно в 10–12 раз больше ширины. Результирующая скорость в зоне завихрения значительно меньше фоновых скоростей и может быть направлена против общего течения воды. В зоне завихрения происходит интенсивное осаждение всех взвешенных частиц, включая микропластик. Кроме того, на несколько порядков увеличивается время нахождения пластиковых микрочастиц непосредственно у поверхности растений, что увеличивает вероятность адгезии поверхностей микропластика и растений, а также агрегации микрочастиц.

Полог из воздушно-водных растений, а также растения с плавающими по поверхности воды листьями способствуют гашению кинетической энергии дождевых капель и снижают вероятность их прямого воздействия на плавающие и уже задержанные микрочастицы. Растения погруженных видов, видов с плавающими на поверхности воды листьями и свободноплавающие задерживают тяжелые частицы (например, частицы полиэтилентерефталата) на своей поверхности или поддерживают их на поверхности воды, не давая им погрузиться в воду и опуститься на дно. Ту же самую функцию выполняет фитопланктон, особенно когда из него формируются поверхностные пленки. Кроме того, все эти группы растений, находясь на поверхности воды, своим присутствием «армируют» поверхностную микропенку воды, не давая ей разрушиться при взаимодействии воздушных масс и поверхности воды.

Среди механизмов влияния на поведение и задержание пластиковых микрочастиц первостепенное значение имеют морфологические особенности макрофитов и густота их произрастания. Именно перекрывание и переплетение листьев и стеблей растений формирует сетеподобную структуру зарослей, где задерживаются пластиковые микрочастицы. Это особенно выражено у воздушно-водных растений. В зависимости от особенностей морфологии различных видов макрофитов, их пространственной структуры, наличия или отсутствия неровностей на стеблях и листьях степень задержания пластиковых микрочастиц, даже при одинаковой густоте зарослей, может существенно различаться.

Многие виды воздушно-водной растительности имеют массивные стебли и листья и сходную морфологию. Значительная часть микрочастиц, природных и искусственных, у этих растений задерживается в местах влагалищно-пластиночного сочленения и узлах отхода листьев от стеблей. Для всех видов макрофитов адгезия к листьям и стеблям чаще всего проявляется у микрочастиц из гибкого материала: микроволокон и микропленок. Изменение адгезивных свойств поверхностей макрофитов может произойти в результате развития фитоперифитонных водорослей, формирующих биопленку с липкой поверхностью.

Для пластиковых микрочастиц из материалов типа пенополистирола и в меньшей мере материалов на основе полиэтилена характерно притягивание их к другим предметам в результате взаимодействия электрических полей. В лабораторных условиях автором было установлено, что расстояние, на котором начинает проявляться действие сил притяжения микрофрагментов к стеблям и листьям макрофитов, зависит от внутренней структуры стеблей растений и размера частиц. При трубчатой и сильно пористой структуре стеблей силы притяжения проявляются слабее и действуют на более близком расстоянии. Уменьшение размеров частиц также приводит к уменьшению расстояния взаимодействия, при этом не всегда пропорционально по отношению к тем же видам растений. Диаметр стебля для растений одного и того же вида не оказывает существенного влияния на расстояние притягивания частиц растениями. При уменьшении диаметра стебля тростника обыкновенного (*Phragmites communis* Trin.) с 8 до 4 мм расстояние начала притягивания уменьшилось с 1,5 до 1,4 см, т.е. всего на 1 мм.

Для широко распространенных видов воздушно-водной растительности расстояние, на котором начинается притягивание частиц пенополистирола, в исследованном размерном диапазоне колеблется в пределах 1,0–1,9 см. Сильнее всего частицы пенополистирола притягивает осока острая (*Carex acuta* L.), листья которой имеют ширину около 4 мм.

На расстояние, при котором начинается притягивание частиц пенополистирола, влияет внутреннее анатомическое строение стеблей. Более низкая степень притягивания микрочастиц растениями рогоза узколистного (*Typha angustifolia* L.) и тростника обыкновенного может быть объяснена наличием у этих видов больших воздухоносных полостей (аэренхимы), которые у других исследованных видов значительно меньше.

При высокой концентрации пластиковых микрочастиц на поверхности воды в пределах зарослей макрофитов возможна агрегация свободноплавающих частиц с уже прикрепленными к растениям. Так, в

наших экспериментах с растениями тростника обыкновенного при различных концентрациях микропленок со средним размером 4,5 мм происходило их слипание, запруживание узких мест между растениями, возникали цепочки прикрепившихся друг к другу микропленок.

Плавающие на поверхности воды частицы в основном задерживаются надводными частями воздушно-водных растений, верхушками некоторых видов погруженных растений, доходящих до поверхности воды, или плавающими на поверхности воды листьями и стеблями. Свободноплавающие растения, а также плавающий растительный опад из фрагментов отмерших макрофитов и листовой опад из деревьев и кустарников могут создавать на поверхности воды плотные запруды, улавливающие практически все плавающие частицы.

Перехват твердого материала, переносимого потоком воды, происходит не только на ее поверхности, но и по всей водной толще и на дне. В толще воды также возможно формирование объемных запруд как из материала, перемещающегося под водой, так и из материала, накопившегося на ее поверхности и под давлением верхних слоев и формирующегося напора воды выдавливаемого вглубь водной толщи. Пористая структура таких запруд и вдольбереговых образований из произрастающей воздушно-водной растительности, неразложившегося растительного опада и детрита является эффективным естественным фильтром, препятствующим попаданию твердых частиц различной природы с водосбора в водоем.

*Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2022-0002 Государственного задания ИВП РАН.*

#### **Список источников**

1. Казмирук В.Д. Барьерная роль макрофитов при загрязнении водных объектов микропластиком // Наука. Инновации. Технологии. 2021. № 3. С. 133–149.
2. Cozzolino L., Nicastrò K.R., Zardi G.I., Santos C.B., Species-specific plastic accumulation in the sediment and canopy of coastal vegetated habitats // Sci. Total Environ. 2020. V. 723. 138018.
3. Xia F., Liu H., Zhang J., Wang D. Migration characteristics of microplastics based on source-sink investigation in a typical urban wetland // Water Res. 2022. V. 213. 118154.

# WHY THE MACROPHYTE THICKETS HAVE LARGE QUANTITIES OF MICROPLASTICS? THE MECHANISMS UNDERLYING THIS PHENOMENON

V.D. Kazmiruk

*Water Problems Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,  
kazm@iwp.ru*

**Abstract.** Twelve mechanisms have been found, as a result of which macrophyte zones are able to effectively retain plastic microparticles. The main mechanisms for this phenomenon: the appearance of additional resistance to the movement of water and air masses, a change in the kinematic structure of water and air flows, decreasing the kinetic energy of wind waves and raindrops, mechanical retention of microparticles by the sieve-like structures made of interweaving of stems and leaves, adhesion of plant surfaces and microparticles, which is enhanced by the sticky surfaces of the periphyton, the interaction of electric fields.

**Keywords:** microplastics, macrophytes, mechanisms, microparticle retention

*This study was carried out under Governmental Order to Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, subject no № FMWZ-2022-0002.*

## ПОГЛОЩЕНИЕ И ВЫВЕДЕНИЕ ФЛУОРЕСЦЕНТНЫХ ЧАСТИЦ МИКРОПЛАСТИКА БРЮХОНОГИМИ МОЛЛЮСКАМИ ОЗЕРА БАЙКАЛ

**С.А. Бирицкая, Е.М. Долинская, М.А. Теплых,  
Я.К. Ермолаева, В.А. Пушница, Л.Б. Бухаева,  
А.В. Лавникова, Т.В. Коркина, Д.И. Голубец,  
Д.Ю. Карнаухов, Е.А. Зилов**

*Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия,  
biritskaya.sofya@mail.ru*

**Аннотация.** Озеро Байкал подвергается высокой антропогенной нагрузке. Загрязнение озера микропластиком с недавнего времени активно изучается, но влияние этих частиц на обитателей озера остается не изученным. В своей работе мы исследуем вопрос поглощения и выведения частиц микропластика у трех видов брюхоногих моллюсков, обитающих в озере Байкал. Данные показывают, что изучаемые виды способны поглощать частицы микропластика вместе с пищей. Поглощенный микропластик выводится из организма моллюска, но требует внимания вопрос накопления частиц в организме.

**Ключевые слова:** флуоресцентный микропластик, брюхоногие моллюски, озеро Байкал

Озеро Байкал – уникальный природный объект. Озеро входит в список всемирного природного наследия ЮНЕСКО, соответствуя всем критериям оценки: является местом обитания редких видов животных и растений, отличается своими геологическими характеристиками, экологическими и биологическими процессами, а также своей красотой. К сожалению, озеро Байкал подвержено высокой антропогенной нагрузке – на его берегах расположено множество населенных пунктов, не имеющих современной инфраструктуры, а ежегодный поток туристов превышает сотни тысяч отдыхающих. Проблема пластикового загрязнения озера привлекает большое внимание со стороны ученых и защитников экологии. В водах озера уже обнаружены частицы микропластика разных типов [1]. Но влияние частиц микропластика с разной морфологической структурой на обитателей озера всё ещё не изучено.

Известно, что разные группы гидробионтов способны воспринимать частицы микропластика в качестве пищи [2, 3]. Это может оказы-

вать негативное влияние на передачу энергии по пищевым цепям, на рост и размножение организмов. Согласно проведенным ранее исследованиям, морские и пресноводные моллюски являются одной из наиболее подверженных влиянию микропластика групп организмов [4]. В озере Байкал брюхоногие моллюски образуют доминантную по биомассе и субдоминантную по численности группу организмов [5]. В своем исследовании мы приняли решение изучить процессы поглощения и выведения фрагментов микропластика тремя видами брюхоногих моллюсков, обитающих в озере Байкал (один вид из числа эндемиков озера и два широко распространенные).

В эксперименте мы использовали три вида брюхоногих моллюсков: *Radix auricularia* (Linnaeus, 1758), *Lymnaea stagnalis* (Linnaeus, 1758), и байкальский эндемик *Benedictia baicalensis* (Gerstfeldt, 1859). Моллюски видов *R. auricularia* и *L. stagnalis* были взяты в количестве 10 штук, а *B. baicalensis* – 13 штук. Также для эксперимента были взяты фрагменты флуоресцентного полистирола. Во время эксперимента каждый моллюск был помещен в индивидуальный аквариум с подключенной аэрацией. Для моллюсков была подготовлена специальная смесь для кормления – 0,15 г пищи, 0,15 г желатина и 5 мг микропластика. Эта смесь была нанесена на индивидуальные предметные стекла для имитации биопленки, которой моллюски питаются в естественных условиях. Затем данной смесью моллюсков кормили один раз в начале эксперимента, и больше моллюски пищи не получали. В течение следующих семи дней отбирались экскременты моллюсков для приготовления препаратов. Экскременты каждый раз были отобраны перед сменой воды: в 15:00 и 17:00 в первый день; в 9:00, 11:00, 13:00, 15:00 и 17:00 во второй, третий и четвертый дни; и в 15:00 на седьмой день эксперимента.

По результатам проведенных экспериментов был получен 231 препарат с экскрементами моллюсков: 73 у *R. auricularia*, 91 у *L. stagnalis* и 67 у *B. baicalensis*. Каждый препарат был сфотографирован под УФ-фонариком для визуализации полученных результатов и оценки степени флуоресценции микропластика (рис. 1).

Степень флуоресценции была оценена следующим образом: 3 – сильная флуоресценция, 2 – средняя флуоресценция, 1 – слабая флуоресценция, 0 – флуоресценция отсутствует. В эксперименте с видом *R. auricularia* в 12 из 73 случаев флуоресценция была оценена как сильная, в 25 случаях как средняя, в 24 случаях как слабая, в 12 флуоресценция отсутствовала. У вида *L. stagnalis* в 3 из 91 случаев флуоресценция была сильной, в 25 средней, в 53 случаях слабая и в 10

флуоресценция отсутствовала. Вид *B. baicalensis* показал наибольшее количество препаратов с отсутствием флуоресценции – 42 случая из 67, слабая флуоресценция наблюдалась в 17 случаях, в 8 случаях флуоресценция была средней, сильная флуоресценция не наблюдалась совсем (таблица).

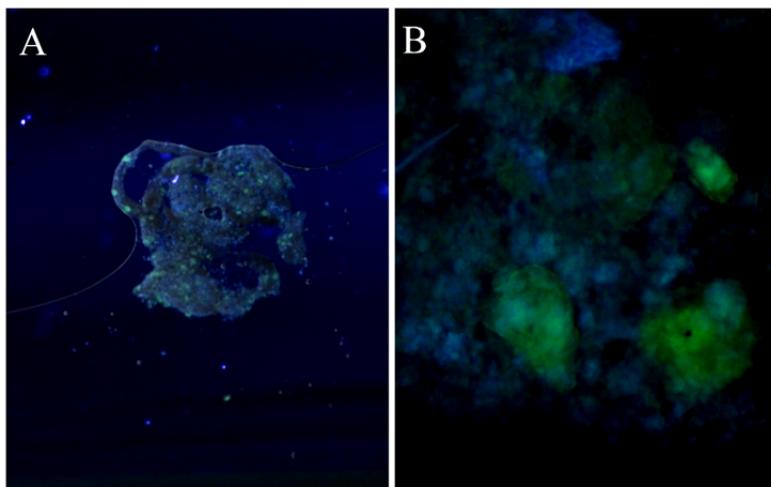


Рис. 1. Препараты с фрагментами флуоресцентного микропластика под УФ светом: А – общий вид; В – под увеличением  $\times 10$

#### Степень флуоресценции микропластика у разных видов

Степень флуоресценции	<i>R. auricularia</i>	<i>L. stagnalis</i>	<i>B. baicalensis</i>
3 – сильная	12	3	0
2 – средняя	25	25	8
1 – слабая	24	53	17
0 – отсутствует	12	10	42
Всего	73	91	67

Корреляционный анализ показал достоверную отрицательную корреляцию между количеством частиц микропластика в фекалиях моллюсков и течением времени только у вида *R. auricularia*. Вид *L. stagnalis* показывает недостоверную отрицательную корреляцию, а у вида *B. baicalensis* корреляция положительная и недостоверная, что может быть связано с особенностями эндемичного вида (рис. 2). Оче-

видно, что при равных размерах моллюсков, у *B. baicalensis* процесс массового выведения частиц микропластика из организма начинается позднее.

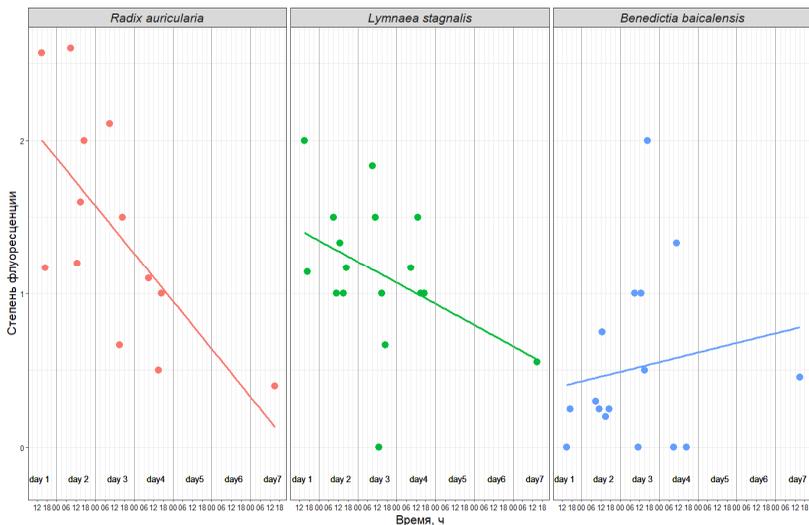


Рис. 2. Корреляционный анализ полученных данных

Таким образом, благодаря проведенным экспериментам мы можем сказать о том, что частицы микропластика могут поглощаться брюхоногими моллюсками и выводиться (по крайней мере частично) из их организма естественным путем. Стоит отметить, что различие в количестве полученных препаратов и степени их флуоресценции могут объясняться физиологическими отличиями изучаемых видов. Требуется дополнительные лабораторные исследования, посвященные изучению процесса аккумуляции частиц микропластика в организме брюхоногих моллюсков.

#### Список источников

1. Meyer M.F., Ozersky T., Woo K.H., Shchapov K., Galloway A.W.E., Schram J.B., Snow D.D., Timofeyev M.A., Karnaukhov D.Yu., Brousil M.R., Hampton S.E. A unified dataset of collocated sewage pollution, periphyton, and benthic macroinvertebrate community and food web structure from Lake Baikal (Siberia) // *Limnol. Oceanogr. Lett.* 2022. V. 7. P. 62–79.

2. Bruck S., Ford A.T. Chronic ingestion of polystyrene microparticles in low doses has no effect on food consumption and growth to the intertidal amphipod *Echinogammarus marinus*? // Environ Pollut. 2018. V. 233. P. 1125–1130.
3. Au S.Y., Bruce T.F., Bridges W.C., Klaine S.J. Responses of *Hyalella azteca* to acute and chronic microplastic exposures // Environ. Toxicol. Chem. 2015. V. 34. P. 2564-2572.
4. Ehlers S.M., Maxein J., Koop J.H.E. Low-cost microplastic visualization in feeding experiments using an ultraviolet light-emitting flashlight // Ecol. Res., 2020. V. 35. P. 265–273.
5. Байкаловедение : в 2 кн. / отв. ред. О.Т. Русинек, В.В. Тахтеев, Д.П. Гладкочуб, Т.В. Ходжер, Н.М. Буднев. Новосибирск : Наука, 2012. 664 с.

### UPTAKE AND EXCRETING FLUORESCENT MICROPLASTICS BY GASTROPODS OF LAKE BAIKAL

S.A. Biritskaya, E.M. Dolinskaya, M.A. Teplykh, Ya.K. Ermolaeva,  
V.A. Pushnitsa, L.B. Bukhaeva, A.V. Lavnikova, T.V. Korkina,  
D.I. Golubets, D.Yu. Karnaukhov, E.A. Zilov

*Irkutsk State University, Irkutsk, Russia, biritskaya.sofya@mail.ru*

**Abstract.** Lake Baikal is subjected to high anthropogenic pressure. Pollution of the lake with microplastics has recently been actively studied, but the effect of these particles on the inhabitants of the lake remains unexplored. In our work, we investigate the issue of uptake and excretion of microplastic particles in three species of gastropod mollusks living in Lake Baikal. The data show that the studied species are able to absorb microplastic particles along with food. The eaten microplastic is excreted from the body of the mollusk, but the issue of particle accumulation in the body requires attention.

**Keywords:** fluorescent microplastics, gastropods, Lake Baikal

## МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ МИКРОПЛАСТИКА В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ ОЗЕРА БАЙКАЛ

М.Ю. Колобов<sup>1</sup>, Е.Б. Таланина<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, lambisscorpio@mail.ru;*

<sup>2</sup> *ФГБУН Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН, Москва, Россия, lenatalanina@mail.ru*

**Аннотация.** В течение нескольких лет отмечаются стабильно высокие концентрации микропластика в поверхностных водах прибрежной зоны Байкала. В период с 2017 по 2021 г. средняя концентрация микропластика выросла в 1,5 раза. Микропластик обнаружен во всех пробах и его заметную долю составляют микроволокна. Его распределение в акватории озера неравномерно – микрочастицы преобладают в Южном бассейне, микроволокна – в Центральном. Положительной зависимости количества микропластика от численности жителей прибрежных населенных пунктов не выявлено, динамика определяется течениями.

**Ключевые слова:** микропластик, озеро Байкал, поверхностные воды

Несмотря на высокий природоохранный статус озера Байкал с одной стороны и злободневную проблему загрязнения водных экосистем микропластиком с другой, исследований загрязнения Байкала этим поллютантом в настоящее время немного.

Исследования направленные на оценку содержания микропластика в поверхностных водах озера Байкал проводились в летний период (август-сентябрь) 2017–2021 гг., вдоль восточного и западного побережья в акваториях Центрального и Южного бассейнов озера.

Ежегодно, отбор проб производился в одних и тех же географических точках, методом траления по одним и тем же маршрутам, что контролировалось инструментами спутниковой навигации. Вдоль восточного побережья Байкала отбор траловых проб проводился около населенных пунктов Максимиха, Танхой, Байкальск, Слюдянка. Три места траления располагались напротив внешней кромки дельты Селенги. Вдоль западного побережья траловые пробы отбирались рядом с населенными пунктами Листвянка, Большое Голоустное, Хужир (о. Ольхон), а также, в заливе Загли (пролив Ольхонские Ворота).

Отбор проб на микропластик производится путем буксировки специализированной сети в поверхностном слое воды за судном при ско-

рости 1–2 узла. Удаление траловых маршрутов от берега составляло от 1 до 2 км, а протяженность непрерывного траления на каждом из маршрутов составляла около 3 км. Объем профильтрованной воды для каждой пробы составлял около 750 м<sup>3</sup>. Для определения точного объема воды, прошедшего через сеть, наряду с инструментами спутниковой навигации, использовался счетчик потока воды General Oceanics (США), установленный на сеть.

Во всех случаях, для отбора проб, использовалась специально разработанная сеть, которая успешно прошла испытания, и конструкция которой уже получила патент на изобретение (патент RU 2 748 673 С1). Размеры горла сети составляли 50×50 см, а длина сетного конусоуловителя 200 см. В качестве сетного материала использовалась полиамидная сетка с размером ячеи 300 мкм. Особенности конструкции сети позволяют обеспечить стабильные метрологические характеристики сети и равномерный забор воды в процессе траления без захвата воздуха с поверхности.

Пробоподготовка заключалась в мокрой минерализации с дальнейшей фильтрацией на полиамидном фильтре с размером ячеи 74 мкм под вакуумом. Идентификация и подсчет частиц микропластика проводился под бинокулярным микроскопом с 10–50-кратным увеличением и методом ИК-Фурье-спектрофотометрии. Поскольку, во время отбора проб, транспортировки, пробоподготовки и анализа волокна легко фрагментируются, они учитывались не по их количеству, а по суммарной длине.

Весь обнаруженный микропластик был разделен на две независимые группы – микрочастицы и микроволокна. Волокна были вынесены в отдельную группу микропластика, и в дальнейшем анализировались отдельно. По нашему мнению, их появление в водах Байкала является процессом отличным от формирования микрочастиц. Если основной причиной образования микрочастиц является разрушение пластиковых изделий (например, упаковки), то причиной появления волокон в большинстве случаев является поступлением хозяйственно-бытовых стоков после стирки одежды.

За период с 2017 по 2021 г. микропластик обнаружены во всех пробах. Весь обнаруженный микро-, мезо- и макропластик был классифицирован как вторичный, находящийся в процессе дальнейшего разрушения – все частицы имели трещины, сколы. Преобладали прозрачные частицы – предположительно разрушенная пищевая упаковка. Химический анализ показал, что преобладают полиэтилен, полипропилен и полистирол – 50%, 40% и 10%, соответственно [1]. Значительная доля

в каждой пробе приходилась на микроволокна. Их массовая доля в пробе составляла от 1 до 10%, что соответствует литературным данным [2].

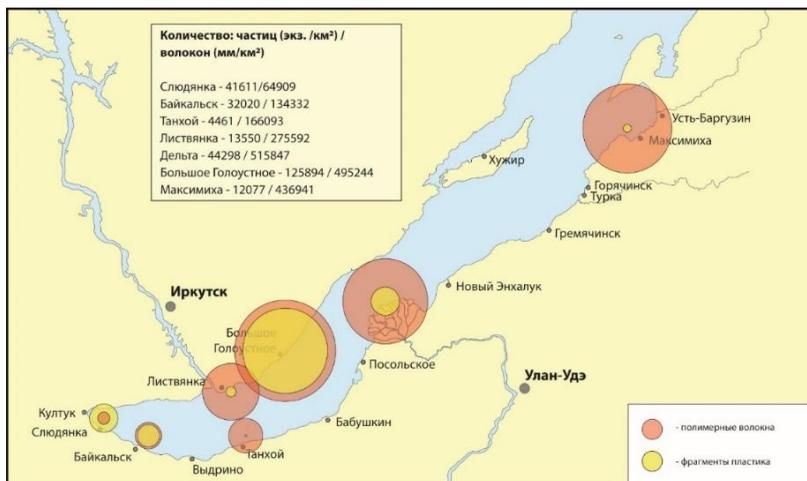


Рис. 1. Распределение частиц пластика и волокон в акватории озера Байкал в 2021 г.

Значительное увеличение средней концентрации частиц микропластика в водах Байкала (188% от значений 2017 г. [1]) отмечено в 2020 г. (таблица). Это может быть связано с окончанием маловодного периода на Байкале, когда сложившуюся вследствие экстремально маловодных лет в 2014–2017 гг. тяжелую ситуацию на Байкале с его уровнем режимом изменил сезон 2018 г., в течение которого в верховьях Селенги шли дожди, что способствовало подъему уровня воды Байкала на 123 см [3]. Большая вода смыла большое количество накопленного пластика с водосборного бассейна Селенги и озера в результате чего, уже в 2021 г. средние концентрации микропластика в водах прибрежной зоны Байкала уменьшились до 150%. Тем не менее, средняя концентрация микропластика в поверхностных водах озера за последние пять лет увеличилась в 1,5 раза.

Основная доля микрочастиц пластика в поверхностных водах озера Байкал концентрируется в акватории Южного бассейна (рис. 1), с преобладанием рядом с поселком Большое Голоустрое. Мы предполагаем, что Большое Голоустрое является местом временной концентрации микропластика выброшенного в Байкал рекой Селенга. Микроволокна

больше распределены в Центральном бассейне Байкала. Микроволокна также имеют высокую концентрацию рядом с поселком Большое Голоустное. В данном случае мы также считаем это следствием накопления волокон, принесенных рекой Селенга. Отмечается высокая концентрация волокон и рядом с поселком Максимиха. Вероятно, такая высокая концентрация является следствием накопления волокон, принесенных рекой Баргузин.

**Динамика изменения концентраций микропластика в поверхностных водах прибрежной зоны в 2017–2021 гг.**

Параметр	2017 г.	2020 г.	2021 г.
Диапазон концентраций частиц микропластика, частиц/км <sup>2</sup>	10 300– 75 000	41 400– 148 000	32 100– 136 840
Средняя концентрация частиц микропластика, частиц/км <sup>2</sup>	42 000	79 000	62 100

Корреляционный анализ (коэффициент корреляции Пирсона) численности жителей прибрежных населенных пунктов и количества микрочастиц пластика и пластиковых микроволокон в водах прибрежной зоны около этих пунктов не выявляет положительной зависимости. Для распределения микрочастиц такая зависимость, оценивается как случайная. Коэффициент корреляции для распределения волокон в течение последних трех лет изменяется со слабоположительного на слабо отрицательный. Таким образом, можно сделать вывод о том, что картина распределения пластиковых микрочастиц и пластиковых микроволокон в акватории Байкала, в первую очередь, формируются поверхностными течениями, которые маскируют возможную связь с хозяйственно-бытовой деятельностью населения на побережье озера.

Не отмечено достоверной многолетней связи повышенных концентраций микропластика с акваториями туристических зон, таких как Листвянка или Малое море (о. Ольхон), как предполагается в других исследованиях [1, 4]. Картина распределения максимума концентраций микропластика динамична. Так, в 2019 г. он наблюдался рядом с поселком Танхой, в 2020 г. – поселком Хужир, в 2021 г. – поселком Большое Голоустное.

**Список источников**

1. Ильина О.В., Колобов М.Ю., Ильинский В.В. Пластиковое загрязнение поверхностных вод озера Байкал // Водные ресурсы. 2021. № 1. С. 42–51.

- Henry B., Laitala K., Klepp I.G. Microfibres from apparel and home textiles: prospects for including microplastics in environmental sustainability assessment // *Sci. Total Environ.* 2018. V. 652. P. 483–494.
- Гармаев Е.Ж., Цыдыпов Б.З. Уровненный режим оз. Байкал: состояние и перспективы в новых условиях регламентации // *Вестник Бурятского государственного университета. Биология, география.* 2019. № 1. С. 37–44.
- Moore M.V., Yamamuro M., Timoshkin O.A., Shirokaya A. A., Kameda Y. Lake-wide assessment of microplastics in the surface waters of Lake Baikal, Siberia // *Limnology.* 2022. V. 23. P. 265–274.

## LONG-TERM DYNAMICS OF MICROPLASTICS IN SURFACE WATERS OF LAKE BAIKAL

M.Yu. Kolobov<sup>1</sup>, E.B. Talanina<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, lambisscorpio@mail.ru*  
<sup>2</sup> *A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution RAS, Moscow, Russia, elenatalanina@mail.ru*

**Abstract.** Stably high concentrations of microplastics in the surface waters alongside the shore of Lake Baikal, with dynamics determined by currents, have been observed for several years. The average concentration of microplastics increased by 1.5 times between 2017 and 2021. Microplastics were found in all samples, and microfibers account for a significant proportion of them. Its distribution in the water area of the lake is uneven – microparticles predominate in the Southern basin, microfibers – in the Central one. No positive dependence of the amount of microplastics on the number of residents of coastal settlements was found.

**Keywords:** microplastics, Lake Baikal, surface waters

## ВНУТРИГОДОВАЯ ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ МИКРОПЛАСТИКА В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ РЕКИ ТОМИ

Е.Д. Воробьев, А.А. Трифонов, С.Н. Рахматуллина,  
Д.С. Воробьев, Ю.А. Франк

*Томский государственный университет, Томск, Россия,  
vorobievegor@gmail.com*

**Аннотация.** Микропластик (МП) представляет собой глобальную проблему из-за широкого распространения в водной среде и потенциального экотоксикологического воздействия на живые организмы. В ходе исследования был проведен ежемесячный количественный учет и определены морфологические характеристики частиц МП в воде р. Томи (правый приток Оби) с апреля по декабрь 2021 г. Содержание МП в поверхностных водах Томи в течение периода наблюдений колебалось от  $0,70 \pm 0,20$  до  $8,67 \pm 4,80$  ед./м<sup>3</sup> с преобладанием микроволокон и микрофрагментов 300–1000 мкм по максимальной оси. Максимальные концентрация МП в поверхностном слое речной воды в весенние месяцы и минимальные значения в ноябре-декабре, наиболее вероятно, связаны с аккумуляцией частиц в толще льда в зимний период и с высвобождением их по окончании ледостава.

**Ключевые слова:** микропластик, загрязнение, пресноводные экосистемы, реки

Микропластик (МП) – это любой тип пластиковых частиц менее 5 мм по наибольшей оси [1]. МП попадает в водные экосистемы из различных источников, включая косметические средства, синтетический текстиль и промышленные процессы, а также образуется при разрушении более крупных пластиковых частиц.

Распространение и поведение частиц МП в речных системах остается недостаточно изученным, несмотря на недавние оценки, предполагающие, что реки доставляют в мировой океан до 80% всего переносимого объема пластикового мусора [2]. Годовой вынос пластиковых отходов с реками в мировой океан оценивается в 0,8–2,7 млн т [3], что еще раз подчеркивает важность рек как основных векторов переноса пластика с суши в морскую среду. Понимание объемов и закономерностей переноса пластика через речные системы в настоящее время имеет решающее значение, поскольку это поможет рассчитать массовый баланс пластикового мусора, циркулирующего в окружающей среде [4].

Отбор проб поверхностных вод р. Томи в наблюдательной станции, расположенной в черте г. Томска, выше от места сброса стоков городских очистных сооружений ( $56^{\circ}23'56.7''\text{N}$ ,  $84^{\circ}56'08.2''\text{E}$ ), проводили ежемесячно, с апреля по декабрь 2021 г. Отбор проб проводился из поверхностного слоя воды (15 см), поскольку большинство полимеров менее плотные, чем пресная вода ( $< 1,00 \text{ г/см}^3$ ) и должны оставаться на поверхности за счет минимальных размеров, небольшой массы и сравнительно низкой относительной плотности материалов [5]. Известно, что лишь некоторые типы МП, такие как нейлон-6, полиэтилентерефталат и поливинилхлорид, могут тонуть из-за более высокой плотности ( $> 1,00 \text{ г/см}^3$ ), и могут частично теряться [6]. В зимние месяцы года отбирали воду из верхнего подледного слоя. Пробы воды в каждой временной точке отобраны в трех повторностях с помощью пробоотборника системы Манта, снабженного нейстальной сетью с диаметром ячеи 0,33 мкм. Объем профильтрованной воды определен с помощью расходомера Hydro-Bios, установленного на пробоотборнике. Количественный учет частиц МП вели визуальным методом под микроскопом (стереомикроскоп Micromed MC2, оборудованный цифровой камерой и программным обеспечением TourView 3.7.6273), используя тест горячей иглой [7].

В ходе проведенных исследований были получены данные о среднем содержании частиц МП в поверхностных водах Томи по месяцам (рис. 1). Максимальная концентрация частиц МП в Томи (до  $8,67 \pm 4,80 \text{ ед./м}^3$ ) приходилась на период после окончания ледостава (апрель-май), затем, в летне-осенний период, идет постепенное снижение концентрации с минимумом  $0,70 \pm 0,20 \text{ ед./м}^3$  в ноябре (рис. 1).

На колебания содержания МП в речной воде могут оказывать влияние природные и антропогенные факторы, такие как уровень воды в реке, сбросы частиц промышленными предприятиями и очистными сооружениями. Максимальное содержание МП в апреле-мае и минимальное – в ноябре-декабре, наиболее вероятно, связаны с перераспределением частиц между водной поверхностью и ледовым покровом. Не так давно показано, что содержание МП в водах р. Шахэ в городской черте Пекина (Китай) явно увеличивалось после таяния ледового покрова с  $1\ 772 \pm 1\ 668$  до  $3\ 877 \pm 2\ 517 \text{ ед./м}^3$  [8].

Наиболее часто среди исследованного МП встречались частицы размером 300–1000 мкм по максимальной оси, за ними следовали более мелкие частицы. Содержание МП от 1000 и более в воде Томи снижалось пропорционально увеличению размера (данные не показаны). Преобладающей группой МП по форме являлись микроволокна (рис. 2).

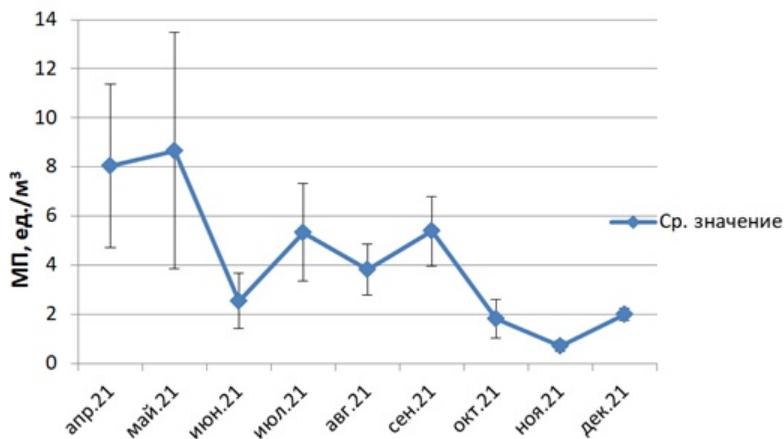


Рис. 1. Динамика среднего содержания частиц МП в воде р. Томи по месяцам в 2021 г. (вертикальными линиями показаны величины стандартного отклонения)

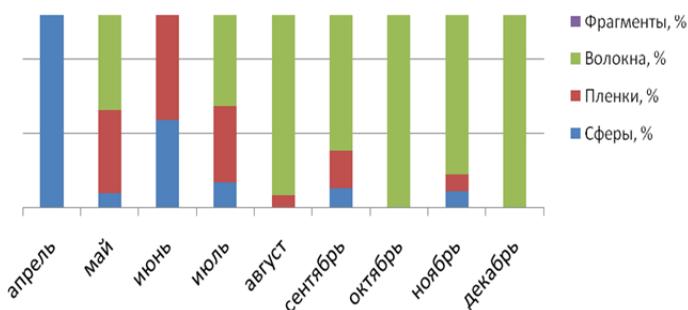


Рис. 2. Процентное соотношение частиц МП разной формы в пробах поверхностной воды по месяцам в 2021 г.

Во всех пробах воды были также представлены микрофрагменты нерегулярной формы, составляющие от 10 до 35% от всех детектированных частиц. Микрофрагменты, в основном, являются вторичными пластиками, которые образуются в результате физической деградации молекул мезо- и макропластиков, в то время как микроволокна попадают в воды сибирских рек в результате стирки синтетических тканей и рыболовной деятельности (как результат распада рыболовных сна-

стей) [9]. В апреле было зафиксировано максимальное содержание сфер (более 63%) в воде р. Томи, второй пик концентрации сфер приходился на июнь (рис. 2), что также может быть связано с повышенным выносом частиц с тальми водами и сбросами промышленными предприятиями в Кемеровской области.

Таким образом, среднее содержание МП в поверхностных водах р. Томи в течение периода наблюдений колебалось от  $0,70 \pm 0,20$  до  $8,67 \pm 4,80$  ед./м<sup>3</sup> с преобладанием микроволокон и микрофрагментов 300–1000 мкм по максимальной оси. Максимальные концентрация МП в поверхностном слое речной воды в весенние месяцы и минимальные значения в ноябре-декабре, наиболее вероятно, связаны с аккумуляцией частиц в толще льда в зимний период и с высвобождением их по окончании ледостава. Для подтверждения или опровержения гипотезы необходим дальнейший мониторинг содержания МП в воде реки Томи и исследование кернов льда в точке отбора проб на предмет концентрации частиц.

*Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).*

#### **Список источников**

1. Arthur C., Joel B., Holly B. Proceedings of the international research workshop on the occurrence. Effects and fate of microplastic marine debris // NOAA Technical Memorandum. 2009.
2. Alimi O.S., Hernandez L.M., Tufenkji N. Microplastics and nanoplastics in aquatic environments: aggregation, deposition, and enhanced contaminant transport // Environmental Science and Technology. 2018. V. 52. P. 1704–1724.
3. Meijer L.J.J., van Emmerik T., van der Ent R., Schmidt C., Lebreton L. More than 1000 rivers account for 80% of global riverine plastic emissions into the ocean // Sci Adv. 2021. V. 7. eaaz5803.
4. Kooi M., Besseling E., Kroeze C., Van Wenzel A.P., Koelmans A.A. Modeling the fate and transport of plastic debris in freshwaters: review and guidance // Freshwater Microplastics. 2018. P. 125–152.
5. Campanale C., Massarelli C., Savino I., Locaputo V., Uricchio V.F. A detailed review study on potential effects of microplastics and additives of concern on human health // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020. V. 17. 1212.
6. Andrady A.L. The plastic in microplastics: a review // Marine Pollution Bulletin. 2017. V. 119. P. 12–22.
7. Hidalgo-Ruz V., Gutow L., Thompson R.C., Thiel M. Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification // Environ Sci Technol. 2012. V. 46. P. 3060–3075.

8. Zhang B., Xu D., Wan X., Wu Y., Liu X., Gao B. Comparative analysis of microplastic organization and pollution risk before and after thawing in an urban river in Beijing // Science of the Total Environment. 2022. V. 828.
9. Frank Y.A., Vorobiev D.S., Kayler O.A., Vorobiev E.D., Kulnicheva K.S., Trifonov A.A., and Hunter T.S. Evidence for microplastics contamination of the remote tributary of the Yenisei river. Siberia. The Pilot Study Results // Water. 2021. V. 13. 3248.

## INTRA-ANNUAL DYNAMICS OF MICROPLASTIC CONTENT IN THE SURFACE WATER OF THE RIVER TOM

**E.D. Vorobiev, A.A. Trifonov, S.N. Rakhmatullina, D.S. Vorobiev, Y.A. Frank**

*Tomsk State University, Tomsk, Russia, vorobievgor@gmail.com*

**Abstract.** Microplastics (MPs) are a global problem due to their wide distribution in the aquatic environment and potential adverse impacts on living organisms. In this study, a monthly quantitative accounting was carried out and the morphological characteristics of MP particles were determined in the water of the river Tom (Ob tributary) from April to December 2021. The content of MPs in the surface waters of the Tom during the observation period ranged from  $0.70 \pm 0.20$  to  $8.67 \pm 4.80$  items/m<sup>3</sup> with a predominance of microfibers and microfragments of 300- 1000  $\mu\text{m}$  on the maximum axis. The maximum concentration of MPs in the surface water in the spring months and the minimum values in November-December is most likely associated with the accumulation of particles in the ice in winter and their release after thawing.

**Keywords:** microplastics, pollution, freshwater ecosystems, rivers

## МЕТОДЫ ОТБОРА И ФИКСАЦИИ ПРОБ ПРЕСНОВОДНОГО МАКРОЗООБЕНТОСА ДЛЯ ДЕТЕКЦИИ МИКРОПЛАСТИКА

Н.В. Холмогорова<sup>1</sup>, Г.М. Чуйко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Удмуртский государственный университет, Ижевск, Россия,  
*Nadjaholm@mail.ru;*

<sup>2</sup> Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН,  
п. Борок Ярославской обл., Россия, *gchuiko@ibiw.ru*

**Аннотация.** Дается краткое описание процедуры отбора и фиксации основных групп пресноводного макрозообентоса для последующего определения содержания в нем микропластика и оценки его влияния на организм животных с использованием биохимических биомаркеров.

**Ключевые слова:** пресные воды, макрозообентос, методы отбора и фиксации проб, микропластик

Многочисленные исследования последних лет показали, что микропластики (размер  $\leq 5$  мм) распространены повсеместно в воде, почве и воздухе и доступны широкому кругу организмов [1]. Однако исследований по биоаккумуляции и оценке токсического эффекта микропластиков для живых организмов пока недостаточно.

По данным обзора [2] в публикациях по накоплению микропластика пресноводными гидробионтами преобладают три таксона животных: ракообразные (31%), рыбы (18%) и моллюски (10%). При этом информация о микропластике в организмах водных насекомых, олигохет, полихет и пиявок фрагментарна. Важным элементом (этапом) в изучении биоаккумуляции и биологических эффектов микропластиков у гидробионтов является унификация методов сбора и фиксации животных для последующего физико-химического анализа, что позволяет максимально снизить влияние этих процедур на конечный результат.

Цель работы – обобщить имеющиеся литературные данные о методах сбора, фиксации и хранения представителей пресноводного макрозообентоса с целью последующего качественного и количественного определения в них микропластиков.

Как показывает обзор литературы отбор бентосных организмов для определения микропластика можно проводить всеми существующими методами от ручного сбора до использования сложных приборов ко-

личественного учета. Отбор представителей зарослевой фауны без учета численности беспозвоночных на вес макрофитов удобнее производить гидробиологическим сачком или скребком. Пробы макрозообентоса на мягких грунтах отбираются с помощью скребков, гидробиологических сачков, дночерпателей (Экмана-Берджа, Ван Вина, Петерсона), донного трала или закидной драги. Драгой пользуются с берега для облова удаленного участка литоральной зоны озера либо глубоководного участка реки, драгируя навстречу потоку. Отобранные донные отложения промывают в ситах и животных выбирают пинцетом. Литореофильных беспозвоночных отбирают путем смыва с камней или вручную. Живые организмы более заметны и легче поддаются выборке. В связи с этим весьма желательно разобрать пробы непосредственно на месте их сбора. Это лучше делать в белой эмалированной кювете с тонким слоем воды.

Наиболее благоприятными периодами для отлова личинок амфибиотических насекомых (весьнянок, подёнок, ручейников, стрекоз и двукрылых) являются весна (май – начало июня) и начало осени (конец августа – сентябрь), когда вылет насекомых либо не начался, либо закончился, а их личинки уже достигли сравнительно крупных размеров.

При выборе двустворчатых моллюсков, являющихся активными фильтраторами, предпочтение отдается двум наиболее массовым группам: сем. Unionidae (pp. *Unio*, *Anadonta* и др.) [3] и сем. Dreissenidae [4]. Наиболее эффективным орудием сбора крупных одиночных двустворчатых моллюсков сем. Unionidae, обитающих преимущественно на мелководье (глубина до 0,5 м), является зубчатый сачёк с ячейей сетки 0,5–1,5 см. На больших глубинах (0,5–3 м) удобно использовать различные виды закидных драг, например драгу Тенсена с зубьями по краям рамки и сетью с ячейей 0,5–1,5 см [3] или «кошку-грабли» [5] в разных модификациях. При этом «кошку-грабли» можно забрасывать в воду с берега или с лодки и подтягивать на тросе. Драгу чаще используют для траления, протаскивая её на тросе за моторным маломерным судном на малой скорости. В глубоководной части водного объекта (свыше 3 м) предпочтительнее использовать дночерпатели различной модификации.

Более мелких двустворчатых моллюсков из сем. Dreissenidae, прикрепляющихся к субстрату и образующих скопления в виде достаточно больших колоний-поселений из отдельных друз, состоящих из десятка и более особей и обитающих на глубинах более 1 м, собирают, преимущественно, с помощью драги Тенсена или «кошки-граблей». В отдельных случаях, когда поселения дрейссены образуются на топ-

ляках деревьев или стоящих в воде сваях, их собирают вручную или с помощью гидробиологического сачка со скребком.

Моллюски должны быть собраны с избытком, с учетом возможного повреждения во время транспортировки и отбора необходимых размерно-весовых групп [5]. Отловленных моллюсков фиксируют в 4% растворе формалина или этиловом спирте. Если планируется определять биохимические биомаркеры влияния на моллюсков микропластика [6], животных сразу после отлова помещают в жидкий азот и хранят в нем или в морозильной камере ( $-18^{\circ}\text{C}$ ) после доставки проб в лабораторию до проведения необходимого анализа. Перед анализом у моллюсков отделяют мягкие ткани от раковины и проводят процедуру экстракции микропластика или готовят пробы для определения биомаркеров любым из известных способов с целью последующего их количественного и качественного анализа физико-химическими методами. При необходимости определения микропластика или биомаркеров в отдельных органах, их препарируют. У оставшихся раковин промеряют линейные размеры: длину, высоту и ширину. Кроме того, определяют массу с целью последующего расчета массы мягких тканей.

Неправильное хранение проб может спровоцировать изменение гранулометрического состава микропластиков в результате частичного разрушения их частиц или их агрегации и, как следствие, невозможность их обнаружения доступными методами. Поэтому при хранении и транспортировке проб желательно использовать процедуры, позволяющие сохранить микропластик в том виде, в котором он был извлечен из окружающей среды [7].

Основные способы хранения и консервации проб макрозообентоса: 1) высушивание при комнатной температуре и хранение в темноте до анализа; 2) замораживание (при температуре до  $-20^{\circ}\text{C}$ ); 3) использование различных растворов-фиксаторов (70% этанол, 4–5% раствор формалина). Поврежденные в ходе отлова и транспортировки организмы следует отбраковывать. Целесообразно заменять потенциальные источники пластикового загрязнения (пластиковую лабораторную посуду, пластиковые сита и приборы) на металлические или стеклянные изделия, однако в случае сетей и некоторых других инструментов такую замену произвести технически невозможно [7].

#### Список источников

1. Brahney J., Hallerud M., Heim E., Hahnenberger M., Sukumaran S. Plastic rain in protected areas of the United States // *Science*. 2020. V. 368. P. 1257–1260.

2. Castro-Castellon A.T., Horton A.A., Hughes J.M.R. Ecotoxicity of microplastics to freshwater biota: considering exposure and hazard across trophic levels // *Science of the Total Environment*. 2021.
3. Жадин В.И. Сем. Unionidae. Новая серия. Фауна СССР. Моллюски. Москва ; Ленинград : Изд-во Акад. наук СССР, 1938. 169 с.
4. Скоробогатов Я.И. Дрейссена: систематика, экология, практическое значение. М. : Наука, 1994. 240 с.
5. Шкорбатов Г.Л., Скоробогатов Я.И. Методы изучения двустворчатых моллюсков // *Тр. ЗИН АН СССР*. Л., 1990. 208 с.
6. Чуйко Г.М., Томилина И.И., Холмогорова Н.В. Комплексная оценка биоэкологических и химических систем: учебное пособие. Ярославль : ЯрГУ, 2018. 140 с.
7. Зобков М.Б., Есюкова Е.Е. Микропластик в морской среде: обзор методов отбора, подготовки и анализа проб воды, донных отложений и береговых наносов // *Океанология*. 2018. № 1. С. 149–157.

## METHODS OF SAMPLING AND FIXATION OF FRESHWATER MACROZOOBENTHOS FOR THE DETECTION OF MICROPLASTICS

N.V. Kholmogorova<sup>1</sup>, G.M. Chuiko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Udmurt state University, Izhevsk, Russia, nadjaholm@mail.ru*

<sup>2</sup> *Papanin Institute for Biology of Inland Waters RAS, Borok, Russia, gchuiko@ibiw.ru*

**Abstract.** A brief description of the procedures for selecting and fixing the main groups of freshwater macrozoobenthos for subsequent determination of the microplastic content in it and evaluation of its effect on the animal body using biochemical biomarkers is given.

**Keywords:** freshwater, macrozoobenthos, sampling and fixation procedures, microplastics

**ПОТРЕБЛЕНИЕ МИКРОПЛАСТИКА  
СИБИРСКОЙ ЛЯГУШКОЙ *RANA AMURENSIS*  
BOULENGER, 1886 В ЗАПАДНОМ ПРИБАЙКАЛЬЕ  
НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ ОНТОГЕНЕЗА**

**В.Н. Куранова, Ю.А. Рогачева,  
С.Н. Рахматуллина, Ю.А. Франк**

*Томский государственный университет, Томск, Россия, kuranova49@mail.ru*

**Аннотация.** Впервые проведена количественная и качественная оценка содержания микропластика (МП) в личинках и желудочно-кишечном тракте (ЖКТ) взрослых особей сибирской лягушки *Rana amurensis* поймы реки Голоустной, впадающей в Байкал. В ЖКТ взрослых особей *R. amurensis* МП представлен волокнами (80,6%), сферами (6,2%), пленками (6,2%) и фрагментами неправильной формы (3,0%). Обнаруженные частицы МП имели размеры 0,3–1,0 и 1,0–2,0 мм (по 31,3%), 2,0–3,0 мм (21,9%), 0,15–0,30 и 3,0–4,0 мм (по 6,25%), 4,0–5,0 мм (3,0%). Выявлены половые и возрастные отличия в уровне потребления МП лягушками. Детекция микропластика в ЖКТ земноводных косвенно указывает на загрязнение долины и устья реки, включая побережье озера Байкал.

**Ключевые слова:** микропластик, земноводные, *Rana amurensis*, Западное Прибайкалье

Микропластик (МП) представляет потенциальную опасность для окружающей среды и здоровья человека и животных, что связано с механическими повреждениями органов и тканей, высвобождением токсичных мономеров в живых организмах, с адсорбцией и переносом консервативных загрязнителей в водной среде. Сведения о накоплении и токсичном воздействии МП на разные стадии онтогенеза земноводных носят крайне фрагментарный характер [1–4]. Показано, что головастики могут поглощать МП [2–4], и это оказывает негативное влияние на рост и развитие головастиков [1]. Цель настоящего исследования – определить наличие МП в организме личинок и взрослых особей сибирской лягушки *Rana amurensis* Boulenger, 1886 (Anura, Amphibia) Западного Прибайкалья. Вид является массовым, широко распространенным на значительной части Северной Азии.

Основой для исследования послужили 64 взрослых особи и 232 личинки сибирской лягушки *R. amurensis*, собранные в период с

14.06.2021 по 30.06.2021 г. на ключевом участке поймы устья реки Голоустная (52°02' N, 105°24' E) (западное побережье Байкала, Иркутская область). С помощью электронных весов у взрослых и личинок определена масса тела (г). Мерные признаки – длина туловища ( $L - Longitudo corporis$ ) и длина хвоста личинок ( $L.cd - Longitudo caudalis$ ) мм измерены с помощью электронного штангенциркуля. Для точного определения возраста взрослых особей использован метод скелетохронологии [5]. На содержание МП у взрослых особей взято 27 проб желудочно-кишечного тракта (ЖКТ). Для анализа МП также отобрано 120 экземпляров личинок *R. amurensis* из двух водоемов, которые были объединены в 6 групп по 20 особей в зависимости от стадии развития [6]: 1 группа – 39; 2 группа – 41; 3 группа – 42–43; 4 группа – 45 стадии; 5 группа – 46 стадия; 6 группа – 47 стадия.

Извлечение частиц МП из головастиков и ЖКТ взрослых лягушек проведены по модифицированному протоколу, ранее использованному для анализа частиц в моллюсках [7]. Для экстракции МП осуществляли растворение мягких тканей целых особей головастиков с использованием щелочного гидролиза, разделение частиц по плотности в насыщенном растворе NaCl (1,19 г/мл), вакуумную фильтрацию с использованием мембранного фильтра 0,45 мкм (Newstars). Фильтры с извлеченным МП использовали для количественного анализа частиц и их категоризации по морфологическим признакам. Все манипуляции проводили и с контрольными пробами (дистиллированная вода без головастиков). Полученные в контроле результаты вычитали при определении количества частиц в организмах головастиков. Анализ проводили с помощью световой микроскопии (стереомикроскоп Micromed MC2), цифровой камеры и программного обеспечения TourView 3.7.6273, используя тест горячей иглой. Извлеченные частицы МП были классифицированы на четыре группы по их форме: сферы, пленки, волокна/линии и фрагменты неправильной формы (включая пенопласт) [8], а также – по их основным размерам на шесть групп: 0,15–0,30 мм, 0,30–1,00 мм, 1,00–2,00 мм, 2,00–3,00 мм, 3,00–4,00 мм и 4,00–5,00 мм [9].

Статистическая обработка осуществлена с использованием программ Statistica for Windows 8.0 и Excel. Для выявления половых различий по содержанию МП использован непараметрический U-тест Манна–Уитни. Обилие МП различной формы и размеров оценивалось как количество частиц на один экземпляр лягушки и группу личинок.

На западном побережье Байкала в дельте реки Голоустная сибирская лягушка тесно связана с пойменными водоемами. Населяет от-

крытые низинные болота, разнотравно-злаковые и прибрежные заочкаренные луга. Зимует подо льдом в непромерзающих озерах [10]. Личиночные водоемы имеют естественное и антропогенное происхождение. Головастики отловлены из двух водоемов: первый – расположен в 1,1 км на юго-восток от пос. Большое Голоустное в 20–30 м слева от проселочной дороги, ведущей на берег озера Байкал. Длина водоема примерно 150–200 м, ширина – 50 м. Водоем хорошо освещен, занимает естественное рельефное понижение, подпитывается талыми водами. Дно илистое, с большим количеством водной растительности. В водоеме и по берегам бытовой мусор – пластиковые бутылки, целлофановые пакеты. Второй водоем шириной 1,5–2 м, длиной – 10 м расположен в этом же направлении на автомобильной дороге, питается атмосферными осадками. В водоеме редкая водная растительность, дно каменистое с илом и песком.

В шести группах личинок *R. amurensis* ( $n = 120$ ), выделенных по стадиям развития, не обнаружено частиц МП. Одной из причин является временный характер и низкая продуктивность изученных нерестовых водоемов, где происходили выклев и личиночное развитие. Показано, что распространенность того или иного типа частиц может быть разной, в зависимости от источников поступления МП в водную среду и особенностей питания исследуемой группы организмов [4]. Переход головастика *R. amurensis* к активному питанию происходит на стадии 34, т.е. через 3–4 суток после выклева. Питание продолжается до начала метаморфического климакса – стадия 50. В составе пищи наблюдается максимальная встречаемость детрита и водорослей. Часто поедаются водоросли, растущие на подводных предметах, что указывает на питание головастика *R. amurensis* на дне водоема и зарослях. Вместе с пищей в кишечник головастика попадает песок: у особей стадий 45–47 он найден в 83–100% кишечника [11]. Личинки более поздних стадий (48–54) в отловах еще отсутствовали. Сроки размножения и развития зависят от погодных условий весенне-летнего периода конкретного года. Эмбриональное и постэмбриональное развитие личинок охватывает от 49 до 60–66 дней, в отдельные годы может затянуться почти до 2,5 месяцев. Первые сеголетки появляются с конца июня, пик чаще приходится на вторую половину июля; при позднем размножении – до начала августа, а в отдельные годы затягивается до середины сентября [10].

МП обнаружен в ЖКТ лягушек в возрасте от 1+ до 4+ ( $n=27$ ) (таблица 1). Их трофический спектр шире, чем у личинок. Они поедают, в основном, сухопутных моллюсков, пауков, гусениц, прямокрылых,

полужесткокрылых, жесткокрылых (доминируют жужелицы), жуков, членистоногих, перепончатокрылых (бескрылые муравьи), коконы пауков и яйца двукрылых. Одновременно с пищей лягушки заглатывают песок и растительные остатки (листья и соцветия осок и злаков [11]). У взрослых особей *R. amurensis* МП представлен сферами, пленками, волокнами и фрагментами неправильной формы. В лягушках возраста от 1+ до 4+ преобладают волокна – 80,6%, доля пленок и сфер составила по 6,2%, фрагментов – 3,0% (таблица).

#### Содержание частиц МП в ЖКТ *Rana amurensis*\*

Параметры	Сферы	Пленки	Волокна	Фрагменты	Всего
$X \pm m_x^*$	0,2 ± 0,2	0,2 ± 0,2	2,6 ± 0,6	0,1 ± 0,1	3,2 ± 0,6
Min-max	0–3,6	0–4,6	0–11,6	0–1	0–11,6
SD	0,8	0,9	3,1	0,3	0,6
CV, %	373,9	509,9	121,5	282,4	383,6

\* Среднее арифметическое на одну особь ± стандартное отклонение.

Обнаруженные частицы МП объединенной выборки лягушек 1 года и старше имели размеры 0,3–1,0 и 1,0–2,0 мм (по 31,3%), 2,0–3,0 мм (21,9%), 0,15–0,30 и 3,0–4,0 мм (по 6,25%), 4,0–5,0 мм (3,0%).

Самки накапливают МП в ЖКТ значительно больше, чем самцы ( $U = 12,5$ ,  $p \leq 0,01$ ). У самок выше средние линейно-весовые размеры по сравнению с самцами: самки ( $n = 8$ ) –  $L = 47,9$  (40,5–58,6) мм, масса – 9,97 (5,8–20,3) г; самцы ( $n = 10$ ) –  $L = 46,3$  (42,2–49,8) мм, масса – 8,8 (6,6–13,7) г. Кроме того, среди самок отмечено 25% особей в возрасте 4+, среди самцов – 70% особей в возрасте 2+ и 30% – 3+. Ранее показано, что суточный рацион *R. amurensis* 1 года и старше – 0,4–1,1 г. За лето одна лягушка длиной 37,5–46,5 мм потребляет 38,5–54,1 г добычи, особь длиной 54,4–57,9 мм – 48,2–100,7 г [11].

*Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).*

#### Список источников

1. Boyero L., López-Rojo N., Bosch J., Alonso A., Correa-Araneda F., Pérez J. Microplastics impair amphibian survival, body condition and function // *Chemosphere*. 2020. V. 244. 125500.
2. da Costa Araújo A.P., Silva de Melo N.F., Gonçalves de Oliveira Junior A., Postalli Rodrigues F., Fernandes, de Andrade Vieira J.E., Lopes Rocha T., Malafaia G. How much are microplastics harmful to the health of amphibians?

- A study with pristine polyethylene microplastics and *Physalaemus cuvieri* // *J Hazard Materials*. 2020. V. 382. 121066.
3. Kolenda K., Kuśmierk N., Pstrowska K. Microplastic ingestion by tadpoles of pond-breeding amphibians—first results from Central Europe (SW Poland) // *Env Sci Pollut Res*. 2020. V. 27. P. 33380–33384.
  4. Куранова В.Н., Рогачева Ю.А., Франк Ю.А. Микропластик в личинках земноводных // *Вопросы герпетологии: VIII съезд Герпетологического общества А.М. Никольского при РАН «Современные герпетологические исследования Евразии»*. М. : КМК, 2021. С. 154–156.
  5. Смирин Э.М. Методика определения возраста амфибий и рептилий по слоям в кости // *Руководство по изучению земноводных и пресмыкающихся*. Киев : Ин-т Зоологии АН УССР, 1989. С. 144–153.
  6. Дабяган Н.В., Слепцова Л.А. Травяная лягушка // *Объекты биологии развития*. М. : Наука, 1975. С. 442–462.
  7. Jahan S., Strezov V., Weldekidan H., Kumar R., Kan T., Sarkodie S.A., He J., Dastjerdi B., Wilson SP. Interrelationship of microplastic pollution in sediments and oysters in a seaport environment of the eastern coast of Australia // *Science of the Total Environment*. 2019. V. 695. 133924.
  8. Cowger W, Gray AB, Eriksen M, Moore C, Thiel M. Evaluating wastewater effluent as a source of microplastics in environmental samples // *Microplastics in Water and Wastewater* / eds by H.K. Karapanagioti, I.K. Kalavrouziotis. London, UK : IWA Publishing, 2019. P. 109–131.
  9. Frank Y.A., Vorobiev E.D., Babkina I.B., Antsiferov D.V., Vorobiev D.S. Microplastics in fish gut, first records from the Tom River in West Siberia, Russia // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2020. № 52. С. 130–139.
  10. Тропина М.Г. К морфологии, распространению и экологии бурых лягушек Западного Прибайкалья // *Байкальский зоологический журнал*. 2021. № 1. С. 52–58.
  11. Кузьмин С.Л. Экология и биоценотическая роль сибирской лягушки (*Rana amurensis* Pall.) в Монголии // *Герпетологические исследования в Монгольской Народной Республике*. М., 1986. С. 22–59.

**MICROPLASTIC UPTAKE BY SIBERIAN FROG RANA AMURENSIS BOULENGER, 1886 IN THE WEST BAIKAL REGION AT DIFFERENT ONTOGENETIC STAGES**

**V.N. Kuranova, Y.A. Rogacheva, S.N. Rakhmatullina, Y.A. Frank**

*Tomsk State University, Tomsk, Russia, kuranova49@mail.ru*

**Abstract.** A quantitative assessment of the microplastics (MP) content in the larvae and gastrointestinal tract of adults of the Siberian frog *Rana*

amurensis in the floodplain of the Goloustnaya River, which flows into Baikal, was carried out for the first time. In gastrointestinal tracts of *R. amurensis* adults, MT was represented by fibers (80.6%), spheres (6.2%), films (6.2%), and irregularly shaped fragments (3.0%). The detected MP particles had sizes of 0.3–1.0 and 1.0–2.0 mm (31.3% each), 2.0–3.0 mm (21.9%), 0.15–0, 30 and 3.0–4.0 mm (6.25% each), 4.0–5.0 mm (3.0%). Gender and age differences in MP uptake by frogs were revealed. The detection of MP in the gastrointestinal tract of amphibians indirectly indicates the pollution of the valley and the mouth of the river, including the coast of Lake Baikal.

**Keywords:** microplastics, amphibians, *Rana amurensis*, West Baikal region

## ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ ПЛАСТИКОМ: ГЕНЕЗИС, КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЛИКВИДАЦИИ

М.С. Полякова<sup>1</sup>, О.В. Ильина<sup>2</sup>, В.В. Ильинский<sup>2</sup>,  
Я.Ю. Блиновская<sup>3</sup>, Ю.Г. Алексеева<sup>4</sup>, А.В. Соколова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН, Иркутск,  
Россия, poljakova.m@gmail.com

<sup>2</sup> МГУ им. М.В. Ломоносова, Биологический факультет, Москва, Россия,  
ilyina\_o@mail.bio.msu.ru

<sup>3</sup> Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия,  
blinovskaya@hotmail.com

<sup>4</sup> Ассоциация по развитию экотуризма в Республике Бурятия,  
Улан-Удэ, Россия, alexeeva-buzina@mail.ru

**Аннотация.** Показатели пластикового загрязнения береговой линии озера Байкал на шести станциях юго-восточного побережья составили 0,02–0,16 кг/м. Основные источники загрязнения обеспечены отходами рыболовства. Только 10% собранных отходов было принято на переработку. Предполагается, что решение проблемы пластикового загрязнения в удаленных регионах требует комплексного подхода, включающего сокращение потребления пластика и рециклинг, а также внедрение экологичной утилизации неперерабатываемых отходов.

**Ключевые слова:** пластиковое загрязнение, микропластик, макропластик, озеро Байкал, переработка пластиковых отходов

С 2020 г. на Байкальской природной территории было значительно сокращено размещение твердых коммунальных отходов. Тем не менее значительные объемы отходов были накоплены ранее в ходе многолетнего функционирования необорудованных мусорных полигонов. В то же время на озере Байкал весьма высокую популярность имеют экологические волонтерские акции по уборке побережья. Вывоз мусора с берега имеет несомненные эстетические эффекты. Однако собранные отходы как правило направляются на локальные полигоны, где могут впоследствии служить источником вторичного загрязнения акватории.

В качестве возможного решения проблемы пластикового загрязнения традиционно приводятся идеи циклической экономики [1]. В данной работе исследуется состав и происхождение берегового пластика,

а также проводится оценка возможности переработки пластиковых отходов, присутствующих на береговой линии.

Береговое пластиковое загрязнение оценивалось на шести береговых участках, расположенных в дельте реки Селенга (станции 1-1 и 1-2) и на открытом юго-восточном побережье озера Байкал (станции 1-3, 1-4, 1-5, 1-6) (рис. 1). Длина обследованных береговых участков составила от 65 до 719 м, суммарная длина – 1 934 м. Для каждого пластикового предмета, фиксировались тип полимера и функциональное назначение. Все категории предметов взвешивались.

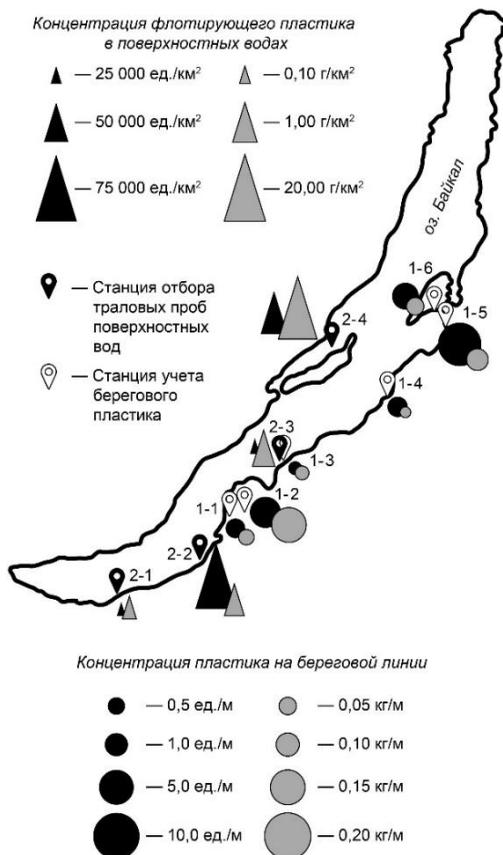


Рис. 1. Показатели пластикового загрязнения береговой линии и прибрежных вод [2] озера Байкал

Массовая концентрация пластика на обследованных участках составила 0,02–0,16 кг/м (0,26–9,48 ед./м) со средними показателями 0,05 кг/м (0,98 ед./м) и 0,02 кг/м (1,24 ед./м) для дельты р. Селенга и открытого побережья оз. Байкал, соответственно.

Суммарно было проанализировано 2 307 единиц и 55,7 кг пластиковых отходов. В массовом эквиваленте доминировали отходы рыболовства, емкости для питья и синтетический текстиль (рис. 2, а). В составе собранных отходов преобладали композитные материалы, включающие два и более типа полимеров, и ПЭТ. Доля полиэтилена составила 15% (рис. 2, б).

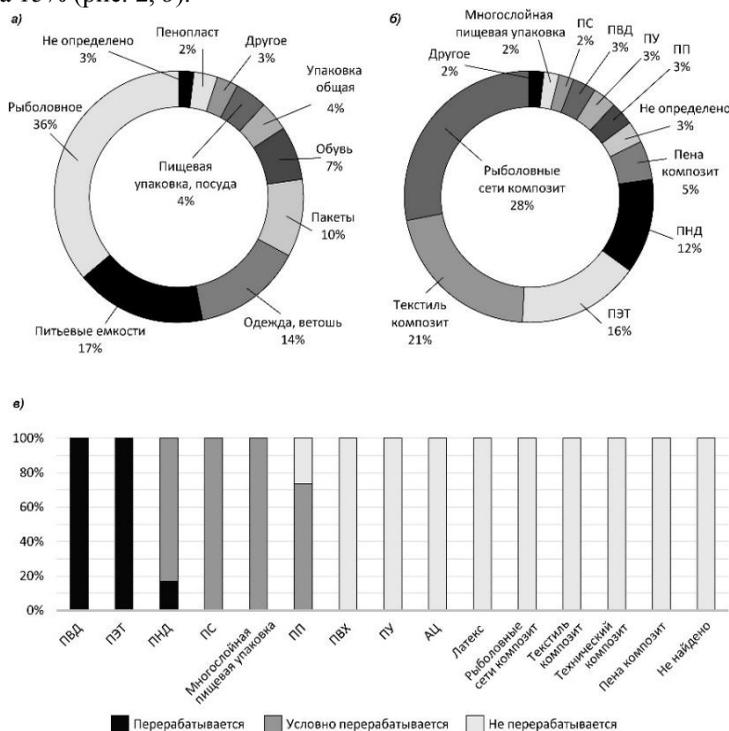


Рис. 2. а – происхождение берегового пластикового загрязнения; б – Состав берегового пластикового загрязнения; в – возможность переработки материалов, обнаруженных в составе береговых отходов. Суммарная выборка, N = 2 307, m = 55,7 кг. ПЭТ – полиэтилен терефталат, ПНД – полиэтилен низкого давления, ПП – полипропилен, ПУ – полиуретан, ПВД – полиэтилен высокого давления, ПС – полистирол, ПВХ – поливинилхлорид, АЦ – ацетат целлюлозы

Присутствие микропластика в поверхностных водах озера Байкал было показано ранее в ряде работ [2, 3]. В частности, в работе [2] нами было показано, что более 99% частиц, выделенных из поверхностных вод, относится ко вторичному микропластику, то есть возникает в результате деградации более крупных фрагментов. Состав микропластика на станциях был проанализирован методом ИК-спектроскопии.

В составе выборки микропластика со станций 2-1, 2-2 и 2-3 [2] преобладали частицы полиэтилена (60%), полипропилена (20%) и полистирола (8%) (N = 25). В траловых пробах были обнаружены только полимеры, имеющие положительную плавучесть, в то время как в составе берегового пластика преобладают фракции, способные к захорониванию на дне (композитные фракции, ПЭТ).

Собранные пластиковые отходы были направлены на экспертизу в перерабатывающие и заготовливающие компании г. Улан-Удэ. Материалы, которые принимались в регионе, относили к перерабатываемым. Материалы, для которых существуют перерабатывающие предприятия в России, но не принимаемые в качестве коммерческого вторичного сырья в Республике Бурятия, относили к условно перерабатываемым. Все остальные виды пластиковых отходов были отнесены к неперерабатываемым (рис. 2, в).

В суммарной выборке 20,5% по массе было отнесено к перерабатываемым отходам, 16,4% – к условно перерабатываемым и 63,1% – к неперерабатываемым. При этом только 10,0% собранных пластиковых отходов было принято на переработку в г. Улан-Удэ. Наблюдаемое различие между формально и фактически перерабатываемыми отходами связано с качеством вторичного сырья, которое значительно снижается в процессе нахождения в водной среде.

Полученные данные свидетельствуют о присутствии пластиковых отходов на береговой линии озера Байкал в количествах, составляющих, вероятно, десятки тонн. Волонтерские береговые уборки способны удалить эти отходы непосредственно с береговой линии, однако, будучи перемещенными на полигоны ТКО, они продолжают создавать нагрузку на экосистему. Более половины попадающих в экосистему отходов не может быть переработано даже при условии оптимизации системы обращения и раздельного сбора ТКО. Очевидно, сокращение пластикового загрязнения таких уникальных природных объектов, как озеро Байкал, требует комплексных решений, включающих сокращение потребления пластиковых материалов, переработку потенциально перерабатываемых фракций и внедрение схем экологичной утилизации неперерабатываемых отходов.

## Список источников

1. The New Plastics Economy. Rethinking the future of plastics. World Economic Forum. Ellen MacArthur Foundation. 2016. 36 p.
2. Ильина О.В., Колобов М.Ю., Ильинский В.В. Пластиковое загрязнение прибрежных поверхностных вод среднего и южного Байкала // Водные ресурсы. 2021. № 1. С. 42–51.
3. Moore M.V., Yamamuro M., Timoshkin O.A., Shirokaya A.A., Kameda Yu. Lake-wide assessment of microplastics in the surface waters of Lake Baikal, Siberia // *Limnology*. 2022. V. 23. P. 265–274.

## PLASTIC POLLUTION OF LAKE BAIKAL. ABUNDANCE, COMPOSITION AND PROSPECTS FOR CLEANUPS

M.S. Polyakova<sup>1</sup>, O.V. Pyina<sup>2</sup>, V.V. Il'insky<sup>2</sup>, Ya.Yu. Blinovskaya<sup>3</sup>,  
Yu.G. Alexeeva<sup>4</sup>, A.V. Sokolova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, Irkutsk, Russia, poljakova.m@gmail.com*

<sup>2</sup> *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, ilyina\_o@mail.bio.msu.ru*

<sup>3</sup> *Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia, blinovskaya@hotmail.com*

<sup>4</sup> *Ecotourism Association of Buryatia, Ulan-Ude, Russia, alexeeva-buzina@mail.ru*

**Abstract.** Abundance of plastic debris amounted to 0.02-0.16 kg/m at six beach stations on the coast of Lake Baikal. Fishing gear and household plastic dominated the shoreline debris. Only 10% of the waste collected during the survey was accepted for recycling. The strategy for reducing plastic pollution in the remote regions is supposed to require an integrated approach that includes reducing plastic consumption and recycling, as well as introducing sustainable disposal of non-recyclable residues.

**Keywords:** microplastics, plastic pollution, plastic debris, Lake Baikal, recycling

## ЗАВИСИМОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ МИКРОПЛАСТИКА ОТ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОСАДКОВ ПРИБОЙНОЙ ЗОНЫ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

П.Н. Кривошлык<sup>1,2</sup>, И.П. Чубаренко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия,  
irina\_chubarenko@mail.ru*

<sup>2</sup> *Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калинин-  
град, Россия, Poka20106@yandex.ru*

**Аннотация.** Проведён анализ 175 проб осадка (пески, гранулы, мелкая галька) прибойной зоны пляжа Вислинской косы (Балтийское море) на содержание частиц микропластика (МП, 0,3–5 мм). Среднее значение составило  $96 \pm 67$  штук МП на килограмм сухого веса, что сопоставимо с загрязнением других балтийских пляжей. Уровень загрязнения оказался независим от средней величины зерна осадка и коэффициента его сортировки. Подтверждается возможность использования этого параметра для целей долгосрочного мониторинга загрязнения микропластиком пляжей Балтийского моря.

**Ключевые слова:** песок, галька, зона заплеска, пластик

Микропластик (МП, частицы пластика < 5 мм) легко переносится морскими течениями, поэтому обнаруживается в настоящее время в самых удалённых и необитаемых местах планеты. В результате одновременного действия множества природных факторов наблюдающаяся картина загрязнения неоднородна, пятниста, что затрудняет оценку общего уровня загрязнения и выявление потенциально наиболее уязвимых биологических видов. В данном исследовании проверяется предположение о зависимости уровня загрязнения частицами МП (диапазон размеров 0,3–5 мм) песков прибойной зоны пляжа от их характеристик – гранулометрического состава и сортировки.

Сбор образцов производился на северной оконечности Вислинской косы (юго-восточная часть Балтийского моря). С ноября 2019 г. по январь 2021 г. было произведено в общей сложности 43 выхода. Пробы отбирались в фиксированных точках. Преобладающими образцами (163 штуки) оказались песчаные отложения, но также были отобраны 12 проб галечных отложений. В некоторых выходах (07.03.2020; 22.08.2020; 12.12.2020; 03.01.2021) образцы песка и гальки были отобраны одновременно в одной точке (на расстоянии 1–1,5 м друг от друга). Всего таких образцов получилось 8, по 2 на каждый день сбора.

Было отобрано 175 проб из зоны заплеска (около 2 см глубины, с площади  $0,3 \text{ м} \times 0,3 \text{ м} = 0,09 \text{ м}^2$ ). Пробы отбирались в новые, чистые полиэтиленовые пакеты и транспортировались в лабораторию. При камеральных работах пробы высушивались в сушильном шкафу (ES-4610, Экросхим) до постоянного веса при температуре  $70^\circ\text{C}$ , при такой температуре пластик остается невредим. Затем сухой образец взвешивали на лабораторных весах (АСОМ JW-1, Acom Inc., Ltd) с точностью до 0,1 г и просеивали через каскад сит (5 мм, 2 мм, 1 мм, 0,5 мм). Песок, прошедший сквозь сито 0,5 мм, в дальнейшем исследовании не участвовал. Материал, оставшийся на сите 5 мм, визуально осматривался на предмет антропогенного загрязнения, при обнаружении – протоколировался.

Экстракция частиц МП проводилась модифицированным методом NOAA [1, 2]. Для минимизации внешнего загрязнения при процессе окисления был использован укрывной материал, работы велись в хлопковых халатах, использовалось только стеклянное и металлическое оборудование. Фильтры просматривались на стереомикроскопе (MC1 var. 1C, Микромед) с увеличением от  $10\times$  до  $40\times$ . При просмотре пробы на стереомикроскопе для отслеживания фонового загрязнения использовалась чашка Петри диаметром 10 см.

Первичное определение частиц МП происходило по аналогичным критериям с [3, 4]. Для того чтобы убедиться, что обнаруженные частицы действительно имеют антропогенное происхождение, 45 частиц (0,38% от общего числа) были проанализированы методом рамановской спектроскопии [5, 6]. Антропогенное происхождение было подтверждено для 98,8% частиц. Для гранулометрического анализа из каждой пробы заранее отбирались 100 г. материала. Разделение на фракции проводилось с помощью Грохота. Для типизации использовалась шкала Вентворта [7]. Сортировка и размер зерен проб рассчитывались в программе Gradistat [8]. Средние значения содержания МП в пробах равнялись  $96 \pm 67$  штук на килограмм сухого веса (медиана 65). Преобладающими по форме частицами МП оказались волокна – их содержание составило 98,5% от общего количества. Анализ загрязнения МП в парах образцов песка и гальки, отобранных одновременно в одной точке, показало схожее загрязнение: средние значения для песков  $89 \pm 49$  шт/кг сух.веса (медиана 69), для гальки  $72 \pm 18$  шт/кг сух.веса (медиана 76).

На рис. 1 представлены графики зависимости количества МП на кг сухого веса от (а) размера зерна песка и гальки и (б) коэффициента сортировки.

Коэффициент детерминации для размеров песка и гальки ( $R^2 = 0,0008$ ) и для коэффициента сортировки ( $R^2 = 0,0047$ ) – незначи-

телен, то есть никакой зависимости между накоплением МП и этими гранулометрическими показателями нет.

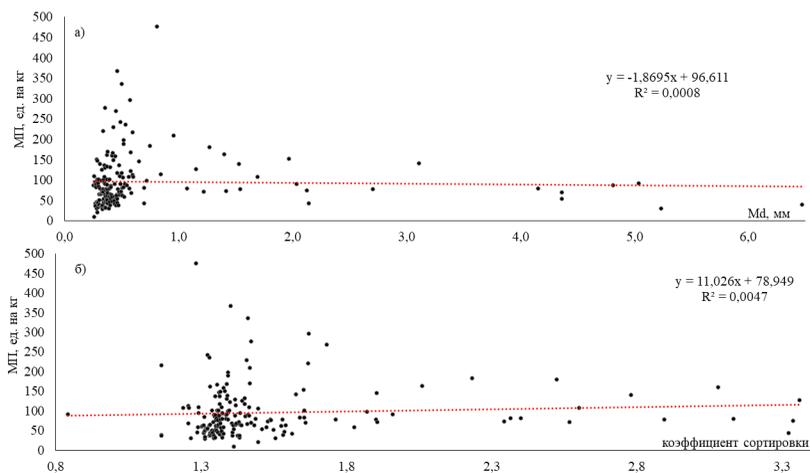


Рис. 1. Взаимосвязь между содержанием частиц МП на кг сухого веса и:  
а – диаметром зерен проб; б – коэффициентом сортировки

Результаты анализа 175 проб осадка (пески, гранулы, мелкая галька) прибойной зоны пляжа Вислинской косы (Балтийское море) на содержание частиц МП (диапазон размеров 0,3–5 мм) показывают среднее значение  $96 \pm 67$  штук на килограмм сухого веса, что сопоставимо с загрязнением других балтийских пляжей – на Куршской косе, в Польши и в Германии [5, 6]. Уровень загрязнения МП осадков прибойной зоны пляжа оказался независим от средней величины зерна и коэффициента сортировки. Ранее авторами было показано и отсутствие существенного сезонного хода этого параметра [9].

*Исследование выполнено при поддержке РНФ (грант 19-17-00041). Отдельную благодарность выражаем лаборатории геологии Атлантики АОИОРАН за предоставленное оборудование для гранулометрического анализа и А.Ю. Зюбину за проведение спектрометрического анализа.*

#### Список источников

1. Esiukova E. Plastic pollution on the Baltic beaches of Kaliningrad region, Russia // Mar. Pollut. Bull. 2017. V. 114. P. 1072–1080.

2. Masura J., Baker J., Foster G., and Arthur C. Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: Recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments, 2015.
3. Mohamed Nor N.H., Obbard J.P. Microplastics in Singapore's coastal mangrove ecosystems // *Mar. Pollut. Bull.* V. 79. P. 278–283.
4. Zobkov M., Esiukova E. Microplastics in Baltic bottom sediments: Quantification procedures and first results // *Mar. Pollut. Bull.* V. 114. P. 724–732.
5. Esiukova E., Lobchuk O., Haseler M. and Chubarenko I. Microplastic contamination of sandy beaches of national parks, protected and recreational areas in southern parts of the Baltic Sea // *Mar. Pollut. Bull.* 2021. V. 173. 113002.
6. Esiukova E., Zobkov M., Chubarenko I. Data on microplastic contamination of the Baltic Sea bottom sediment samples in 2015–2016 // *Data in Brief.* 2020. V. 28. 104887.
7. Wentworth C.K. A scale of grade and class terms for clastic sediments // *The Journal of Geology.* 1922. V. 30. P. 377–392.
8. Blott S.J., Pye K. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments // *Earth Surf. Process. Landf.* 2001. V. 26. P. 1237–1248.
9. Krivoslyk P.N., Chubarenko I.P. Seasonal variations in the content of microplastic particles in the sands of the beach swash zone // *J. Oceanol. Res.* 2021. V. 49. P. 57–66.

## **DEPENDENCE OF MICROPLASTIC CONTENT ON GRANULOMETRIC INDICATORS IN THE SEDIMENTS OF THE SURF ZONE OF THE SEA**

**P.N. Krivoslyk<sup>1,2</sup>, I.P. Chubarenko<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,  
irina\_chubarenko@mail.ru*

<sup>2</sup> *Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia,  
Poka20106@yandex.ru*

**Abstract.** Contamination with microplastics (MP, 0.3-5 mm here) was analyzed in 175 sediment samples (sands, granules, small pebbles) taken from the surf zone of the sea beach of the Vistula Spit (the Baltic Sea). The average value was  $96 \pm 67$  MPs items per kilogram of dry sediment weight, which is comparable to contamination of other Baltic beaches. The level of contamination turned out to be independent on the mean size of the sediment grains and the sorting coefficient. The possibility of using this parameter for the purposes of long-term monitoring of MP contamination of the Baltic Sea beaches is confirmed.

**Keywords:** sand, pebbles, swash zone, plastic

## ЧАСТИЦЫ ПЛАСТИКА В МОРСКОМ И ПРЕСНОМ ЛЬДУ: РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

И.Ю. Бочерикова<sup>1</sup>, И.П. Чубаренко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Балтийский Федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, Россия, ibocherikova@yandex.ru*

<sup>2</sup> *Институт океанологии Российской академии наук, Москва, Россия, irina\_chubarenko@mail.ru*

**Аннотация.** Проведена серия лабораторных экспериментов по замораживанию кернов льда из пресной и солёной воды, содержащей частицы пластика разного размера, толщины, плотности, формы. Подтверждается отсутствие явных закономерностей вертикального распределения пластиковых частиц. Предполагается, что это обусловлено значительным влиянием на перемещение частиц со стороны пузырьков воздуха и мигрирующего в каналах солевого раствора.

**Ключевые слова:** пластик, пресный и солёный лёд, лабораторный эксперимент

В течение последнего десятилетия проблема загрязнения среды отходами пластика стоит очень остро. Натурные исследования показали, что морской лёд может быть вторичным источником загрязнения пластиком и средством транспорта для частиц пластика [1]. В опубликованных исследованиях не было обнаружено конкретной закономерности в вертикальном распределении частиц микропластика в кернах морского льда [2]. Задачей данного исследования и лабораторных экспериментов было выяснение характеристик распределения частиц пластика морском и пресном льду.

Серия лабораторных экспериментов включала работы с замораживанием пресной и соленой (34‰) воды, в которую были добавлены частицы (от 0,2 мм до 1,5 см), полиэтилентерефталата, полистирола, пенополиуретана и нити нейлона (1 до 80 см). Мелкие частицы изготавливались как из новых пластиковых изделий, так и из собранных на морском пляже. Пластиковые частицы намеренно подбирались разного размера, толщины, плотности, формы, чтобы в экспериментах проявились наиболее общие закономерности.

Сосуд с пресной или солёной (NaCl х/ч) водой (объём 5,4–6,5 л) и набором частиц пластика помещался в морозильную камеру (темпера-

тура до минус 18°C). Боковые стенки и дно теплоизолировались пластинами пенополистирола (5 см). Непосредственно под дно сосуда помещалась металлическая плита, температура которой (0,6–0,9°C) автоматически поддерживалась постоянной в течение всего эксперимента. Показания 4 датчиков температуры, расположенных в воздухе морозильной камеры, на поверхности и у дна экспериментальной колонки и на подогревающей плите, регистрировались с частотой 1 раз в 15 сек. Таким образом обеспечивалось замерзание водной колонки с поверхности, имитирующее реальный природный процесс. Длительность процесса замерзания изменялась от 3 до 7 дней. Затем керн извлекался и помещался (горизонтально) для таяния на подставку, изготовленную из металлических пластин, обеспечивающую раздельный сбор талых вод и частиц пластика от секций керна толщиной по 5 см. При работе с солёным льдом, рассол от 5-сантиметровых секций собирался в раздельные ёмкости для последующего получения профиля солёности в керне. Частицы пластика также собирались послойно, оседая в раздельных фильтровальных воронках. Эта методика позволяет определять вертикальное распределение как частиц МП, так и солёности по толщине керна.

Проведено в общей сложности 8 тестовых экспериментов, из них 6 кернов были из пресной воды и два – из соленой (34%). В зависимости от условий и длительности процесса охлаждения (от 2 до 7 суток), длина полученных кернов составила от 5 см до 23 см (средняя длина 16,4 см).

Результаты экспериментов показывают, что пластиковые частицы вмёрзают в лёд хаотично и их положение в керне не зависит от плотности их материала. На рис. 1 в качестве примера показано распределение пластиковых частиц в керне пресной воды (21 см, длительность замерзания 7 суток) по слоям 5-сантиметровой толщины. Набор частиц в данном эксперименте состоял из тонущих материалов: фрагментов (0,3–15 мм) полистирола, полиуретана, полиэтилентерефталата (ПЭТ) и нейлона, и нейлоновых нитей (от 1 до 80 см длины). Изначально, все частицы располагались на дне ёмкости. В результате, на поверхности керна частиц обнаружено не было, только длинная (80 см) нейлоновая нить оказалась расположенной в толще керна вертикально, с большими участками на поверхности льда и на дне.

Во втором слое (от 5 до 10 см от поверхности) обнаружены две частицы полистерена (желтый и красный, разных размеров, рис. 1), пенополиуретан (голубые губки), зеленые нейлоновые нити (3 шт. по 1 см), и фрагменты мозаики (3 шт.).



Рис. 1. Распределение экспериментальных частиц пластика в керне пресной воды

Насквозь через второй и третий слой оказалась вморожена 10-сантиметровая зеленая нейлоновая нить. В третьем слое (10–15 см) находились красные частицы полистерена (2 шт.) и 1 фрагмент флюоресцирующего ПЭТ. В четвертом слое (15–20 см) обнаружены: зеленые нейлоновые нити (5 см и 1 см), мозаика, полистерен красный и желтый. В нижнем слое (20–21 см) остались невсплывшие частицы: зеленая нейлоновая нить (1 см), полиуретан (2 шт.), частицы ПЭТ из материала, собранного на морском пляже (4 шт.), фрагменты нейлоновой лески для триммера (4 шт.), мозаика и частицы флюоресцирующего ПЭТ.

Керны из солёной воды механически значительно отличаются от пресных: лёд непрозрачен, состоит из хорошо различимых тонких пластинок, пропитан рассолом. В зависимости от режима охлаждения, удалось получить керны длиной от 3,5 до 23 см. В последнем случае, большинство частиц пластика остались внизу.

Анализ наблюдений за процессом замерзания и результирующим распределением пластиковых частиц в ядрах льда позволяет выделить две противоположные тенденции в перемещении пластиковых частиц по вертикали. Во-первых, благодаря гидрофобности пластиков, на них оседают пузырьки воздуха, в результате чего пластиковые частицы на каком-то этапе замерзания ядра всплывают к границе воды и льда и постепенно вмерзают в лёд. В случае замерзания солёной воды, когда значительно более сильная солевая+термическая конвекция могут удерживать мелкие частицы пластика в толще воды, после замерзания происходит выделение и вытекание вниз рассола, что, по-видимому, и приводит к концентрации мелких частиц у самого дна. При этом более крупные частицы могут оставаться в толще льда. Наличие таких противоположных тенденций, по-видимому, и обуславливает хаотичное распределение пластиковых частиц в толще льда. Отсутствие каких-либо тенденций в распределении микропластика в толще льда подтверждается натурными исследованиями арктических льдов [1, 2].

*Исследования проводятся в рамках проекта РНФ № 19-17-00041.*

#### Список источников

1. Peeken I., Primpke S., Beyer B. Arctic sea ice is an important temporal sink and means of transport microplastic // Nat. Commun. 2018. V. 9. 1505.
2. Kanhai D.K., Gardfeldt K., Krumpfen T., Thompson R.C., O'Connor I. Microplastics in sea ice and seawater beneath ice floes from the Arctic Ocean // Scientific reports. 2020. V. 10, P. 1–11.

#### PLASTIC PARTICLES IN SEA AND FRESH ICE: RESULTS OF THE LABORATORY EXPERIMENT

I.Yu. Bocherikova<sup>1,2</sup>, I.P. Chubarenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,  
*irina\_chubarenko@mail.ru*

<sup>2</sup> Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia,  
*ibocherikova@yandex.ru*

**Abstract.** A series of laboratory experiments on freezing ice cores from fresh and salt water containing plastic particles of different sizes, thicknesses, densities, and shapes were carried out. The absence of obvious patterns of vertical distribution of plastic particles is confirmed. It is assumed that this is due to the significant influence on the movement of particles from air bubbles and salt solutions migrating in the channels.

**Keywords:** plastic, fresh and salty ice, laboratory experiment

## МОНИТОРИНГ ПЛАВАЮЩЕГО МОРСКОГО МУСОРА, ПОСТУПАЮЩЕГО В БЕЛОЕ МОРЕ С ВОДАМИ Р. СЕВЕРНАЯ ДВИНА И Р. ОНЕГА

М.П. Погожева<sup>1,2</sup>, Е.И. Котова<sup>2</sup>, М.А. Микушева<sup>2,3</sup>,  
А.Ю. Кожевников<sup>4</sup>, Е.В. Данилова<sup>4</sup>, Е.В. Якушев<sup>2,5</sup>

<sup>1</sup> Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, Москва,

*Rossia, pogojeva\_maria@mail.ru*

<sup>2</sup> Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup> Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

<sup>4</sup> Центр коллективного пользования научным оборудованием «Арктика»,  
Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова,  
Архангельск, Россия

<sup>5</sup> Норвежский институт водных исследований, Осло, Норвегия

**Аннотация.** Данное исследование посвящено первичной оценке поступления плавающего мусора с водами р. Северная Двина и р. Онега в Белое море. Мониторинг проводился в дельте р. Северная Двина и устье р. Онега в 2021 г. в течение безледного периода. Для регистрации данных использовалась международная методика, упрощающая и унифицирующая процесс сбора и обработки данных. Результаты исследования показали, что общая скорость поступления плавающего мусора составляет от 13 до 85 частиц/час в разные месяцы. Проведенные исследования показали возможность сбора унифицированных данных для мониторинга поступления плавающего мусора в моря с водами рек, однако выявили специфику таких работ для арктических рек, значительную часть года скованных ледяным покровом.

**Ключевые слова:** загрязнение морей, загрязнение рек, морской мусор, пластик, мониторинг

В настоящее время загрязнение морским мусором, особенно состоящим из пластика, является одной из наиболее актуальных проблем антропогенного воздействия на морскую среду в глобальном масштабе [1]. По текущим оценкам количество пластика, поступающего с суши в морскую среду ежегодно, варьируется от 4,5 до 12,7 млн т, еще 1,75 млн т происходит из морских источников, таких как рыболовство, аквакультура (рыбоводство) и судоходство [2].

Макропластик (бутылки, пакеты и пр.) и микропластик (фрагменты и синтетические волокна размером менее 5 мм) [3] обнаруживаются во всех природных средах. Существенным источником поступления раз-

личных бытовых отходов на арктические побережья является материковый сток. Крупные реки Арктики – Онега, Северная Двина, Печора, Обь, Енисей, Лена, Колыма – выносят в море и береговую зону весь мусор своих бассейнов. Современные бытовые отходы характеризуются наличием значительного количества пластика (ПЭТ), пленки и других пластмасс. Именно реки выносят такие отходы к Северному Ледовитому океану с материка [4]. Большой суммарный речной сток в моря российской Арктики, который оценивается в размере порядка 2 500 км<sup>3</sup>, позволяет предположить и значительный вынос с ним бытовых отходов, однако точных данных на сегодняшний день не существует [5].

Данное исследование было посвящено первичной оценке поступления плавающего макромусора (>2,5 см) с водами р. Северная Двина и р. Онега в Белое море. Мониторинг плавающего мусора проводился в дельте р. Северная Двина и устье р. Онега бассейна Белого моря в 2021 г. в течение безледного периода (май – ноябрь). Наблюдения проводились силами сотрудников Института океанологии им. П.П. Ширшова (РАН) и Центра коллективного пользования научным оборудованием «Арктика» (САФУ им. М.В. Ломоносова). Наблюдения осуществлялись несколько раз в месяц с правого берега на обоих водотоках. Продолжительность каждой сессии 30–60 минут.

Для регистрации данных использовалась международная методика, включающая визуальные наблюдения и регистрацию мусора с помощью специализированного мобильного приложения. Методика содержит единый перечень и классификацию наблюдаемого плавающего мусора, что упрощает процесс обработки и анализа данных и позволяет их сравнивать с данными подобного мониторинга в других районах. Полученные с помощью приложения данные помогают получить представление о количестве плавающего мусора, поступающего с водами исследуемых рек в море, позволяют проанализировать его состав по категориям и приблизительный размер.

Всего в процессе мониторинга было идентифицировано 1 713 частиц, 77% из которых была естественного происхождения (в основном листья, дерево, перья птиц). Среди частиц антропогенного происхождения 59,6% было представлено разного вида пластиками, 27,7% – обработанное дерево (антропогенного происхождения), 8,5% бумага/картон, 2,7% – металл, 1,1% – резина, <1% – текстиль (рис. 1). Общая скорость поступления плавающих частиц варьировала от 13 частиц/час в ноябре до 85 частиц/час в июне.

Проведённые мониторинговые исследования позволили получить предварительную количественную оценку поступления плавающего

мусора с водами р. Северная Двина и р. Онега в Белое море в течение года, а также качественно оценить характер основных категорий поступающего мусора. Используемая международная методика была впервые опробована для арктических рек, подтвердила возможность сбора унифицированных данных и удобство в использовании, обработке и хранении данных и может быть рекомендована для дальнейших работ по учету поступления плавающего мусора с реками.

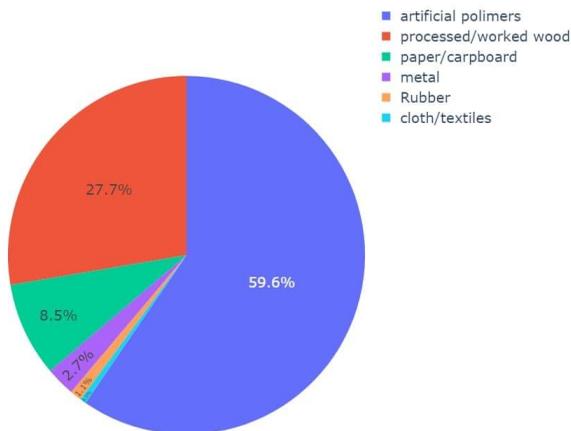


Рис. 1. Соотношение категорий мусора, поступающего с водами р. Северная Двина и р. Онега в Белое море. 2021 г.

#### Список источников

1. Kershaw P.J. Marine plastic debris and microplastics global lessons and research to inspire action and guide policy change. Nairobi : UNEP, 2016. 192 с.
2. Jambeck J.R., Geyer R., Wilcox C., Siegler T.R., Perryman M., Andrady A., Narayan R., Law K.L. Plastic waste inputs from land into the ocean // Science. American Association for the Advancement of Science. 2015. V. 347. P. 768–771.
3. Galgani F., Hanke G., Werner S., Oosterbaan L., Nilsson P., Fleet D., Kinsey S., J. van Franeker R. T., Vlachogianni T., Scoullou M., Mira Veiga J., Palatinus A., Matiddi M., Maes T., Korpinen S., Budziak A., Leslie H., Gago J., Liebez G. Guidance on Monitoring of Marine Litter in European Seas // European Commission, Joint Research Centre. MSFD Technical Subgroup on Marine Litter (TG ML). 2013. 26113. P. 1–126.
4. Соколов Ю.И. Арктика: к проблеме накопленного экологического ущерба // Арктика: экология и экономика. 2013. № 2. С. 18–27.

5. Мизин И. А. Современные проблемы удаления ТБО из труднодоступных районов российской Арктики // Справочник эколога. 2014. № 8. С. 20.

## MONITORING OF FLOATING RIVERINE LITTER INPUT OF THE NORTHERN DVINA AND ONEGA RIVERS TO THE WHITE SEA

M.P. Pogojeva<sup>1,2</sup>, E.V. Kotova<sup>2</sup>, M.A. Mikusheva<sup>2,3</sup>, A.Yu. Kozhevnikov<sup>4</sup>,  
E.V. Danilova<sup>4</sup>, E.V. Yakushev<sup>2,5</sup>

<sup>1</sup> *N.N. Zubov State Oceanographic Institute, Moscow, Russia,  
pogojeva\_maria@mail.ru*

<sup>2</sup> *Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia*

<sup>3</sup> *Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia*

<sup>4</sup> *Core Facility Centre "Arktika", Northern (Arctic) Federal University named  
after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia*

<sup>5</sup> *Norwegian Institute for Water Research, Oslo, Norway*

**Abstract.** According to current estimates, the amount of plastic entering the marine environment from land to sea annually ranges from 4.5 to 12.7 million tons, with another 1.75 million tons coming from marine sources such as fishing, aquaculture (fish farming) and shipping (Jambeck et al., 2015). Continental runoff is a significant source of household waste in the Russian Arctic. The large rivers – the Onega, the Northern Dvina, the Pechora, the Ob, the Yenisei, the Lena, the Kolyma – carry out all the debris from their basins into the sea and the coastal zone. Modern household waste is characterized by the presence of a significant amount of plastic items (Sokolov, 2013). The total river runoff into the seas of the Russian Arctic, which is estimated at about 2500 km<sup>3</sup>, suggests a significant removal of household waste with it, but accurate data is not available yet (Mizin, 2014). This study was devoted to the initial assessment of the flow of floating macro litter (>2.5 cm) with the waters of the Northern Dvina and Onega rivers into the White Sea. Monitoring of floating debris was carried out in the river's deltas in 2021 during the ice-free period (May–November) following a harmonized approach (González-Fernández and Hanke, 2017). The observations were carried out by the trained observers 2 times a month from the coastal platforms. The duration of each session was 30-60 minutes. A Floating Macro Litter mobile application (JRC) was used to record data, including metadata, visual observations and common litter categorization according to 'Guidance on Monitoring of Marine Litter in European Seas' (Galgani et al., 2013).

A total of 1713 particles were identified during the monitoring process, 77% of which were of natural origin (mainly leaves, wood, bird feathers). Among the particles of anthropogenic origin, 59.6% were represented by various types of plastics, 27.7% – processed wood (anthropogenic origin), 8.5%

paper / cardboard, 2.7% – metal, 1.1% – rubber, <1 % – textiles (Fig. 1). The total floating litter flow varied from 13 items/hour in November to 85 items/hour in June.

The conducted monitoring studies made it possible to obtain a preliminary assessment of the flow of floating litter with the waters of the Northern Dvina and the Onega rivers into the White Sea during the year, as well as to assess the composition and size ranges of the main litter categories. The international methodology tested for the first time on Arctic rivers, confirmed the possibility of collecting unified data in the region, however revealed some regional features, hindering such studies mainly due to long winter period with ice cover and understudied amounts of litter flow during ice drift.

**Keywords:** marine pollution, marine litter, plastic, Arctic rivers, monitoring

## МИКРОПЛАСТИК В ПОЧВАХ: РАЗРАБОТКА МЕТОДИК ДЕТЕКЦИИ НА ПРИМЕРЕ АГРОПОЧВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

О.Э. Мерзляков, К.В. Ручкина

*Томский государственный университет, Томск, Россия, molege@mail.ru*

**Аннотация.** Изучение поведения микропластика (МП) и его свойств в почвах на данный момент является актуальным и малоизученным вопросом. Объектом данного исследования стали агросерые лесные почвы и агрочерноземы Западной Сибири. Адаптирована методика определения микропластика в исследуемых агропочвах. Выделение МП проводилось с применением 8М NaCl и 5М ZnCl<sub>2</sub> с разделением по плотности и H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (30%) для удаления органических остатков. Микроскопическим методом выявлено количество и форма МП в исследуемых образцах. МП представлен в форме волокон различной длины (от 0,3 мм до 4,717 мм) и цвета (белый, прозрачный, черный, желтый).

**Ключевые слова:** микропластик, агропочвы, аналитические методы, загрязнение пахотных земель

Загрязнение окружающей среды синтетическими полимерами – одна из крупнейших экологических проблем современности.

Микропластик (МП) – гетерогенный тип загрязнителя с широким диапазоном свойств, размером менее 5 мм в диаметре, включающий наноразмерные частицы.

Почва является одним из самых ценных ресурсов на Земле, обеспечивая ряд важных экосистемных функций и услуг для людей и других организмов [1]. Из-за деятельности человека, такой как, использование пластиковой мульчи в сельском хозяйстве, орошение сточными водами, внесение удобрений, ирригация загрязненной пластиком водой и передача по воздуху, почва стала крупнейшим резервуаром МП, который может быть в 4–23 раза больше, чем в океане [2].

Поэтому нельзя упускать из виду высокую концентрацию МП в почве, так как он представляет потенциальную угрозу для окружающей среды, изменяет химические и физико-химические свойства почв, влияет на микробную активность почвы, уничтожает почвенную фауну и влияет на рост растений [3].

Однако исследования МП в почвах до сих пор проводятся редко, а существующие публикации часто несопоставимы из-за использования

различных методов отбора проб, обработки и анализа. Учитывая сложную природу почв, необходимо найти подходящий и эффективный метод стандартизированного анализа МП в почвенной среде [3].

В целом анализ МП в почве схож с его определением в воде и донных отложениях. В рамках данных исследований, предложено выделять 5 этапов определения МП в почвах:

1-й этап: Отбор проб почвы.

Принимая во внимание, что МП неравномерно распределен в почве рекомендуется использовать составной или отбор смешанной пробы на сельскохозяйственных угодьях, то есть пробы из нескольких участков одной и той же площадки объединяются и гомогенизируются в единую пробу. Отбор единичной пробы больше подходит для несельскохозяйственных почв или для почв, которые менее подвержены антропогенной деятельности.

В большинстве исследований образцы почвы отбирали на площадках ( $5 \times 5$  см,  $10 \times 10$  см,  $20 \times 20$  см) [4].

2-й этап: Подготовка проб почв путём просеивания воздушно-сухой пробы через сито с диаметром ячеек 5 мм [4].

3-й этап: Разделение по плотности – самый распространенный метод извлечения МП из почвы. В этом методе используются солевые растворы известной плотности для выведения частиц микропластика из почвы. При добавлении раствора высокой плотности, частицы пластика плавают на поверхности, а более плотные материалы почвы остаются на дне раствора. Наиболее часто используемыми растворами для разделения МП является NaCl ( $1,2 \text{ г/см}^3$ ), CaCl<sub>2</sub> ( $1,5 \text{ г/см}^3$ ), ZnCl<sub>2</sub> ( $1,6 \text{ г/см}^3$ ), NaI ( $1,8 \text{ г/см}^3$ ) [5].

4-й этап: В дополнение к выделению отдельных типов МП из почв с большим содержанием гумуса, простое фракционирование по плотности не может быть достаточным, т.к. плотность почвы органических веществ, как правило, от  $1,0$  до  $1,4 \text{ г см}^{-3}$ , похожа на плотность нескольких типов МП, таких как полиэтилен и нейлон. Следовательно, требуется дополнительный этап удаления органических веществ. В настоящее время, для этих целей, используется перекись водорода (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) [6].

5-й этап: МП, выделенный из проб окружающей среды, необходимо дополнительно идентифицировать и дать количественную характеристику выделенным фрагментам МП. Общие подходы включают визуальную и химическую идентификацию, с помощью инфракрасной или рамановской спектроскопии. Визуальная идентификация является важным шагом, с помощью которого можно напрямую и быстро полу-

чить текстуру поверхности и другие характеристики, таким как размер, форма и окраска [6].

В результате проведённых исследований были адаптированы две методики определения МП для малогумусных почв (содержание варьирует от 2–4%) на примере агросерой лесной почвы (содержание гумуса 3,34%) таежно-лесной зоны с применением 8М NaCl, и для почв со средним содержанием гумуса (содержание варьируется от 6–8%) на примере агрочернозема степной зоны (содержание гумуса 7,94%) с применением 5М ZnCl<sub>2</sub>.

Методика:

1. Почва предварительно просеивается через сито с диаметром ячеек 5 мм для удаления веточек, палочек и крупного пластика.
2. Высушивается до воздушно-сухого состояния.
3. Отбираются три пробы каждого образца по 50 г и помещаются в сухие чистые плоскодонные колбы на 500 мл.
4. Добавляется раствор 8М NaCl 200 или 5М ZnCl<sub>2</sub>.
5. Растворы взбалтываются в течение 1 минуты, после взбалтывания их оставляют на ночь для разделения по плотности.
6. На следующий день верхняя фаза (примерно половина раствора) аккуратно переносится в плоскодонные колбы на 250 мл и отстаивается еще 12 часов.
7. Повторение пункта 6.
8. Добавляется H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (30%) 20 мл, при использовании ZnCl<sub>2</sub> добавляется HNO<sub>3</sub> (5–6 капель) для растворения выпавшего осадка. Оставляем раствор на 24 часа для окисления органики.
9. Проводится финальное разделение по плотности в выделительных воронках.
10. Фильтрация через окрашенный фильтр размером 0,45 мкм в вакуумной установке.
11. Идентификация микроскопическим методом.

В результате было определено количество и формы МП в исследуемых образцах почв. В исследуемых образцах почв, МП представлен в форме волокон различной длины (от 0,3 мм до 4,717 мм) и окраски (белая, прозрачная, черная, желтая и пр.), а также единичных прозрачных плёнок. Наиболее загрязненной МП агропочвой в исследуемых образцах является агросерая лесная почва.

#### Список источников

1. Yu, Hong & Zhang, Ying & Tan, Wenbing & Zhang, Zheng. Microplastics as an emerging environmental pollutant in agricultural soils: effects on ecosystems and human health // *Frontiers in Environmental Science*. 2022. V. 10. 855292.

2. Nizzetto, L., Futter, M., and Langaas, S. Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin? // Environ. Sci. Technol. 2016b. V. 50. P. 10777–10779.
3. Sajjad M., Huang Q., Khan S., Khan M., Liu Y., Wang J., Lian F., Wang Q., Guo G. Microplastics in the soil environment: A critical review // Environmental Technology & Innovation. 2022. V. 27. 102408.
4. Möller J., Löder M., Laforsch C. Finding microplastics in soils – a review of analytical methods. // Environmental Science and Technology. 2020. V. 54. P. 2078–2090.
5. Dioses-Salinas D.C., Pizarro-Ortega C.I., De-la-Torre G.E. A methodological approach of the current literature on microplastic contamination in terrestrial environments: current knowledge and baseline considerations // Sci. Total Environ. 2020. V. 730. 139164.
6. He D., Luo Y., Lu S., Liu M., Song Y., Lei L. Microplastics in soils: analytical methods, pollution characteristics and ecological risks // TrAC Trends in Analytical Chemistry. 2018. V. 109.

## MICROPLASTICS IN SOILS: DEVELOPMENT OF THE DETECTION METHODS ON THE EXAMPLE OF AGRO-SOILS IN WEST SIBERIA

**O.E. Merzlyakov, K.V. Ruchkina**

*Tomsk State University, Tomsk, Russia, molege@mail.ru*

**Abstract.** The study of the behavior of microplastics (MP) and its properties in soils is currently a topical and little-studied issue. The object of this study was agro-gray forest soils and agro-chernozems of Western Siberia. The technique for determining MP in the studied agricultural soils has been adapted. MP isolation was carried out using 8M NaCl and 5M ZnCl<sub>2</sub> with separation by density and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (30%) to remove organic residues. The microscopic method revealed the amount and form of MPs in the studied samples. MP is presented in the form of fibers of various lengths (from 0.3 mm to 4.717 mm) and colors (white, transparent, black, yellow).

**Keywords:** microplastics, agricultural soils, analytical methods, contamination of arable land

## ЗАГРЯЗНЕНИЕ РЕЧНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ МИКРОПЛАСТИКОМ НА ПРИМЕРЕ ПРИТОКА ЕНИСЕЯ, Р. НИЖНЯЯ ТУНГУСКА

Ю.А. Франк, Е.Д. Воробьев, А.А. Трифонов, Я.Р. Лемешко,  
Д.С. Воробьев

*Томский государственный университет, Томск, Россия,  
yulia.a.frank@gmail.com*

**Аннотация.** Представлены результаты количественной оценки содержания микропластика (МП) в воде и донных отложениях крупного притока Енисея, р. Нижняя Тунгуска, а также детекции частиц в желудочно-кишечном тракте рыб. МП обнаружен в пробах поверхностных вод реки (от  $1,20 \pm 0,70$  до  $4,53 \pm 2,04$  ед./м<sup>3</sup>) и донных отложений (от  $235 \pm 83,0$  до  $543 \pm 94,1$  ед./кг). Показано, что антропогенная деятельность по всей протяженности Н. Тунгуски вносит значимый вклад в загрязнение вод реки. Микрочастицы также найдены в желудочно-кишечном тракте *Leuciscus leuciscus* L. (у 75% особей в среднем течении и у 43% в устье реки). Наиболее вероятными источниками волокон, преобладающих среди всех форм обнаруженных частиц, служат стирка и эксплуатация синтетических текстильных изделий, а также рыболовная активность местного населения.

**Ключевые слова:** микропластик, реки Сибири, загрязнение, вода, донные отложения, рыбы

Микропластик (МП) выносится с речным стоком в океаны и континентальные водоемы, поэтому реки являются важнейшими путями транспорта загрязнителя [1, 2]. По некоторым оценкам до 80% пластика попадает в океаны именно с речным стоком [3]. В соответствии с опубликованными результатами количественного анализа содержания МП в водах Восточно-Сибирского, Баренцева, Карского морей и моря Лаптевых, реки Сибири были определены как второй по значимости источник загрязнения Евразийской Арктики [4]. Однако вклад крупных рек Сибири в загрязнение морей Северного Ледовитого океана остается неопределенными, а распространение МП в речных системах Оби, Енисея и Лены крайне слабо изучено на сегодняшний день.

Целью исследования была количественная оценка содержания МП в воде и донных отложениях крупного притока Енисея, р. Нижняя Тунгуска, а также детекция частиц в ЖКТ речных рыб. Пробы воды и

донных отложений, а также сбор биологического материала проводили в июне-июле 2021 г. в среднем течении реки – вблизи с. Ербогачён Катангского района Иркутской области (ER) и в месте впадения в Енисей – в окрестностях с. Туруханск в Красноярском крае (TU). Отбор проб, лабораторную обработку и анализ МП проводили как описано ранее [5, 6].

Среднее содержание МП в поверхностном слое воды р. Нижняя Тунгуска в районе с. Ербогачён составило 1,20–2,01 частиц на кубический метр (табл. 1). Причем, достоверных различий между сайтами ER-1 (выше села по течению) и ER-2 (ниже села) не выявлено (табл. 2).

Таблица 1

**Содержание МП в поверхностной воде и донных отложениях  
р. Н. Тунгуска вблизи с. Ербогачён (ER), р. Н. Тунгуска  
и р. Енисей вблизи с. Туруханск (TU)**

Показатели	ER-1	ER-2	TU-1	TU-2	TU-3
МП в воде, ед./м <sup>3</sup>	2,01±0,52	1,20±0,70	3,01±0,91	2,89±0,51	4,53±2,04
МП в донных отложениях, ед./кг	543±94,1	235±83,0	353±47,0	353±237	489±367

В нижнем течении р. Нижняя Тунгуска (устье реки, с. Туруханск, сайт TU-3) содержание МП было выше (в среднем 4,53 единицы на кубический метр) и отличалось от показателя для сайта ER-2 при  $p < 0,05$  (табл. 1, 2). Концентрации МП в поверхностной воде р. Енисей до впадения Нижней Тунгуски (TU-1) и ниже по течению от её устья (TU-2) находились примерно на том же уровне (2,89–3,01) и достоверно не различались между собой (табл. 1, 2).

Среднее содержание МП в донных отложениях р. Нижняя Тунгуска в сайте ER варьировало от 235 до 543 частиц на килограмм сухого веса (табл. 1). Интересно, что выше по течению было зафиксировано достоверно больше частиц, чем ниже по течению от села (табл. 2). В донных отложениях, собранных в устье р. Нижняя Тунгуска, детектировано в среднем 489 частиц на килограмм сухого веса, их содержание достоверно не отличалось от показателей в районе с. Ербогачён (табл. 1, 2), поэтому невозможно сделать выводы о влиянии антропогенного фактора на общий уровень загрязнения донных отложений реки МП. Коллебания распространения МП в донных отложениях по течению реки обусловлено тем, что перераспределение загрязнителя может произойти на значительном расстоянии от источника загрязнения; течения, турбулентность и ветровое воздействие способствуют скоплению

плавающих частиц в изгибах; замедление течения может быть связано с формированием биообрастаний и опусканием более плотных фрагментов на дно [7].

Т а б л и ц а 2

**Достоверность различий содержания МП в воде / донных отложениях между исследованными сайтами (на основании критерия Манна–Уитни)**

	ER-1	ER-2	TU-1	TU-2	TU-3
ER-1		– / 0,05	– / 0,05	0,05 / –	– / –
ER-2	– / 0,05		0,05 / –	0,05 / –	0,05 / –
TU-1	– / 0,05	0,05 / –		– / –	– / –
TU-2	0,05 / –	0,05 / –	– / –		– / –
TU-3	– / –	0,05 / –	– / –	– / –	

*Примечание:* «←» – нет статистически значимых отличий; «0,05» – значимые отличия ( $p < 0,05$ ).

В целом по всем исследованным пробам в составе частиц МП в воде преобладали микроволокна (данные не показаны). Второе место по распространенности разделили микрофрагменты и пленки. В донных отложениях заметно доминировали волокна, причем в обоих пробах донных отложениях реки в среднем течении (ER-1 и ER-2) детектированы исключительно микроволокна. Микросферы в момент обследования не встречены ни в воде, ни в донных отложениях р. Нижняя Тунгуска и прилегающего участка р. Енисей. Почти во всех исследованных пробах воды и донных отложений чаще всего встречались частицы от 300 до 1 000 мкм (по максимальной оси).

Для оценки содержания МП в ЖКТ рыб исследованы две группы ельцов обыкновенных (*Leuciscus leuciscus* L.), выловленных в среднем и нижнем течении реки. Микроскопический анализ фильтров с частицами из ЖКТ ельцов, выловленных из Н. Тунгуски в районе с. Ербогачён, позволил выявить МП в 15 особях из 20 проанализированных, что составляет 75% (рис. 1). Для выборки ельцов, выловленных в устье реки, в районе с. Туруханск этот показатель составил 43% (9 из 21 проанализированных особей содержали МП в ЖКТ). В среднем на одного ельца из пойманных в устье реки Н. Тунгуска (в районе с. Туруханск) приходилось  $1,08 \pm 2,33$  единицы МП, на одного ельца из выборки, отловленной выше по течению (с. Ербогачён) в среднем учтено  $2,39 \pm 3,03$  ед. (рис. 1). Анализ количественных данных с применением t-критерия Стьюдента показал, что статистически значимых отличий в содержании МП в ЖКТ между ельцами, выловленными в устье

Н. Тунгуски (ТУ) и выше по течению (ER) нет ( $p > 0,05$ ). МП, обнаруженный в ЖКТ ельцов, был представлен преимущественно волокнами размерами 300–1000 мкм, также широко распространенными в воде и донных отложениях реки (рис. 1).

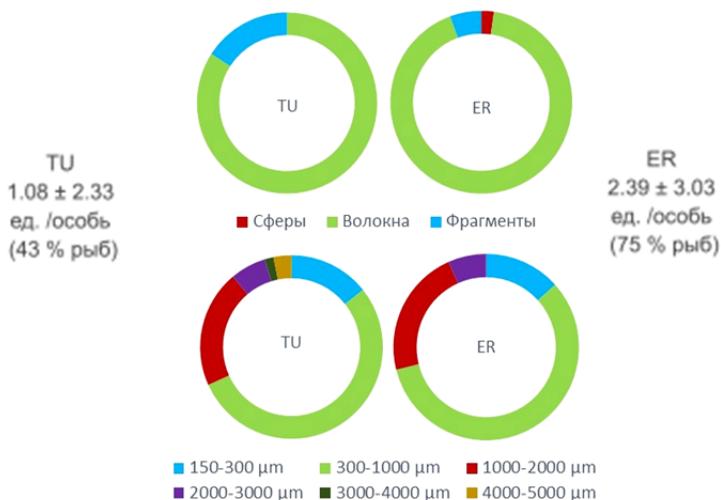


Рис. 1. Содержание МП, соотношение частиц разной формы и размера в ЖКТ ельцов из р. Н. Тунгуска, выловленных вблизи с. Туруханск (ТУ) и с. Ербогачён (ER)

Таким образом, МП детектирован в пробах поверхностных вод, донных отложений и в ЖКТ рыб из правого притока Енисея, р. Нижняя Тунгуска. Наиболее вероятными источниками волокон, которые преобладают среди всех форм частиц в воде, донных отложениях и ЖКТ рыб, являются: 1) стирка и эксплуатация синтетических текстильных изделий; 2) рыболовная активность местного населения. Данные выполненной количественной оценки общего содержания МП в воде р. Нижняя Тунгуска свидетельствуют о том, что отдельно взятый населенный пункт (в частности, село Ербогачён) может не вносить заметного вклада в загрязнение поверхностных вод (по общему количеству частиц). Однако антропогенная деятельность по всей протяженности р. Нижняя Тунгуска привносит значимый вклад в загрязнение вод реки. Отметим, что потребление МП рыбами – дополнительный путь транспорта загрязнителя внутри экосистемы, так как рыбы

ведут подвижный образ жизни и могут перемещаться на значительные расстояния.

*Полевые работы в рамках исследования поддержаны грантом АО «Востсибнефтегаз» «Оценка загрязнения реки Нижняя Тунгуска микропластиком», лабораторная обработка биологических проб и анализ МП в ЖКТ рыб поддержаны проектом Российского научного фонда № 22-27-00720 «Распространение и аккумуляция микропластика в реках Сибири».*

#### **Список источников**

1. Lebreton L.C., van der Zwet J., Damsteeg J.W., Slat B., Andrady A., Reisser J. River plastic emissions to the world's oceans // Nat. Commun. 2017. V. 8. 15611.
2. Skalska K., Ockelford A., Ebdon J.E., Cundy A.B. Riverine microplastics: behaviour, spatio-temporal variability, and recommendations for standardised sampling and monitoring // J. Water Process. Eng. 2020. V. 38. 101600.
3. Alimi O.S., Hernandez L.M., Tufenkji N. Microplastics and nanoplastics in aquatic environments: aggregation, deposition, and enhanced contaminant transport // Environ. Sci. Technol. 2018. V. 52. P. 1704–1724.
4. Yakushev E., Gebruk A., Osadchiev A., Pakhomova S., Lusher A., Berezina A., van Bavel B., Vorozheikina E., Chernykh D., Kolbasova G.; et al. Microplastics distribution in the Eurasian Arctic is affected by Atlantic waters and Siberian rivers // Commun. Earth Environ. 2021. V. 2. 23.
5. Jahan S., Strezov V., Weldekidan H., Kumar R., Kan T., Sarkodie S.A., He J., Dastjerdi B., Wilson S.P. Interrelationship of microplastic pollution in sediments and oysters in a seaport environment of the eastern coast of Australia // Sci. Total Environ. 2019. V. 695. 133924.
6. Frank Y.A., Vorobiev D.S., Kayler O.A., Vorobiev E.D., Kulnicheva K.S., Trifonov A.A., Soliman Hunter T. Evidence for microplastics contamination of the remote tributary of the Yenisei river, Siberia – the pilot study results // Water. 2021. V. 13. 3248.
7. Bellasi A., Binda G., Pozzi A.; Galafassi S., Volta P.R. Microplastic contamination in freshwater environments: a review, focusing on interactions with sediments and benthic organisms // Environments. 2020. V. 7. 30.

## **MICROPLASTIC POLLUTION OF A RIVERINE SYSTEM: EXAMPLE OF THE YENISEI TRIBUTARY, THE NIZHNYAYA TUNGUSKA RIVER**

**Y.A. Frank, E.D. Vorobiev, Y.R. Lemeshko, A.A. Trifonov, D.S. Vorobiev**

*Tomsk State University, Tomsk, Russia, yulia.a.frank@gmail.com*

**Abstract.** Quantification of microplastics (MP) in water and bottom sediments of a large tributary of the Yenisei, the Nizhnyaya Tunguska River was conducted, as well as particle detection in the gastrointestinal tract of fish. MP was found in samples of river surface waters (from  $1.20 \pm 0.70$  to  $4.53 \pm 2.04$  items  $m^{-3}$ ), bottom sediments (from  $235 \pm 83.0$  to  $543 \pm 94.1$  items  $kg^{-1}$ ). It was shown that anthropogenic activity along the entire length of the Nizhnyaya Tunguska makes a significant contribution to the pollution of the river waters. Plastic microparticles were also found in the gastrointestinal tract of *Leuciscus leuciscus* L. (in 75% of individuals in the middle course and in 43% fish in the mouth of the river). The most probable sources of fibers, which predominated among all forms of particles detected, are the washing and exploitation of synthetic textiles, as well as the fishing activity of the local population.

**Keywords:** microplastics, Siberian Rivers, pollution, water, bottom sediments, fish

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛАВАЮЩЕГО МОРСКОГО МУСОРА В АРКТИЧЕСКИХ МОРЯХ РОССИИ В СВЯЗИ С ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

М.П. Погожева<sup>1,2</sup>, А.В. Березина<sup>1,4</sup>, И.А. Жданов<sup>1</sup>,  
А.А. Осадчиев<sup>1</sup>, Г. Ханке<sup>5</sup>, Е.В. Якушев<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> *Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, Москва, Россия,  
pogojeva\_maria@mail.ru*

<sup>2</sup> *Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова,  
Росгидромет, Москва, Россия*

<sup>3</sup> *Норвежский институт водных исследований (NIVA), Осло, Норвегия*  
<sup>4</sup> *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург,  
Россия*

<sup>5</sup> *Объединенный научный центр, Испра, Италия*

**Аннотация.** Основными целями этой работы были сбор новых данных о плавающем морском мусоре и естественных плавающих объектах, предварительная оценка уровня загрязнения мусором и анализ потенциальных источников поступления. Работы были проведены в Белом, Баренцевом, Карском, Лаптевых и Восточно-Сибирском морях. Результаты этого исследования представляют первые данные о распределении плавающего морского мусора в морях российской Арктики в зависимости от океанографических условий (положения водных масс разного происхождения, описываемых характерной температурой, соленостью, растворенным кислородом и рН). Главный вывод этого исследования состоит в том, что плавающий морской мусор был обнаружен только в воде атлантического происхождения, поступающей из Баренцева моря, где средняя плотность на наблюдаемых трансектах составляла 0,92 частиц/км<sup>2</sup>. Восточные части исследования, Карское море, море Лаптевых и Восточно-Сибирское море были практически свободны от плавающих объектов.

**Ключевые слова:** загрязнение морей, морской мусор, пластик, мониторинг

Под плавающим морским мусором понимают относительно крупноразмерную фракцию (> 2,5 см) материала антропогенного происхождения, который может переноситься на большие расстояния течениями, ветром и волнами. Под плавающим морским мусором подразумевают прежде всего пластиковый мусор, который чрезвычайно медленно разлагается по сравнению с мусором из природных материалов.

Он представляет прямую угрозу для морских обитателей и впоследствии разлагается на микропластик (<5 мм). В настоящее время мировая общественность воспринимает плавающий морской мусор как одну из основных проблем загрязнения Мирового океана. Мусор поступает в морскую среду из многочисленных источников на суше и на море. Помимо прямых угроз для морских обитателей, связанных в основном с заглатыванием мусора или запутывания в нем, морской мусор может быть и химическим загрязнителем при выделении из него опасных загрязняющих веществ, он может служить транспортом для перемещения инвазивных видов, представлять опасность для навигации, а также портить эстетическую привлекательность морских объектов, нанося существенный урон туристической индустрии. Мусор может опускаться на дно, выноситься на пляжи и береговые линии или разлагаться на микропластик, но большая его часть может оставаться плавающей на поверхности моря в течение длительных периодов времени и переноситься на большие расстояния [1]. Северный Ледовитый океан представляет собой уязвимую среду с уникальной экосистемой, которая подвергается возрастающему давлению из-за изменения климата, влекущему за собой сокращение ледяного покрова и увеличение антропогенной нагрузки. Данные о морском мусоре в Арктическом регионе крайне скудны в настоящее время и не позволяют оценить пути распространения и источники его поступления. Такая информация необходима для реализации мер по уменьшению загрязнения морской среды [2].

Основными целями этой работы были сбор новых данных о плавающем морском мусоре и естественных плавающих объектах, предварительная оценка уровня загрязнения мусором и анализ потенциальных источников поступления. Работы были проведены в 82 м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» в сентябре-ноябре 2020 г. в Белом, Баренцевом, Карском, Лаптевых и Восточно-Сибирском морях.

Для сбора данных о плавающих объектах использовалась методика института Joint Research Center (Объединенный научный центр, г. Испра, Италия) [3]. При помощи мобильного приложения Floating Litter Monitoring (FLM), установленного на планшет на базе Android, фиксировалось наличие крупных частиц морского мусора на поверхности моря. Наблюдения проводились с палубы судна во время движения. Исходя из высоты наблюдателя над урезом воды и условий наблюдения, выбиралась ширина полосы учета (обычно около 15–30 м), в которой наблюдатель гарантированно различает объекты более 2,5 см согласно методике [4]. Приложение позволяет записывать трек учета с привязкой

каждого объекта к GPS координатам и идентифицировать объекты морского мусора по установленным общепринятым категориям.

Для сбора океанографических данных и интерпретации данных о распределении мусора использовалась установленная на судне система сбора забортной воды с водозаборником, расположенным на глубине 2,5 м с правой стороны судна. Подача воды в проточной системе обеспечивалась бортовым насосом мощностью 900 Вт (3200 л / ч). Система была оборудована термосалинографом (SBE 21 SeaCAT), который непрерывно регистрировал соленость и температуру морской воды. Помимо этого, были установлены волоконно-оптические датчики T, DO и pH компании RuгоScience FireSting pro, регистрирующие концентрации растворенного кислорода (мкМ) и pH. Датчики калибровались до выполнения съемки и после.

Результаты этого исследования представляют первые данные о распределении плавающего морского мусора в морях российской Арктики в зависимости от океанографических условий (положения водных масс разного происхождения, описываемых характерной температурой, соленостью, растворенным кислородом и pH). Сопоставление этих данных показывает, что плавающий морской мусор поступает через пролив Карские ворота из Баренцева моря в Карское. В работе показано, что область его распространения ограничена фронтальной зоной между солеными поверхностными водами Атлантики и более пресными водами Обь-Енисейского плюма (рис. 1).

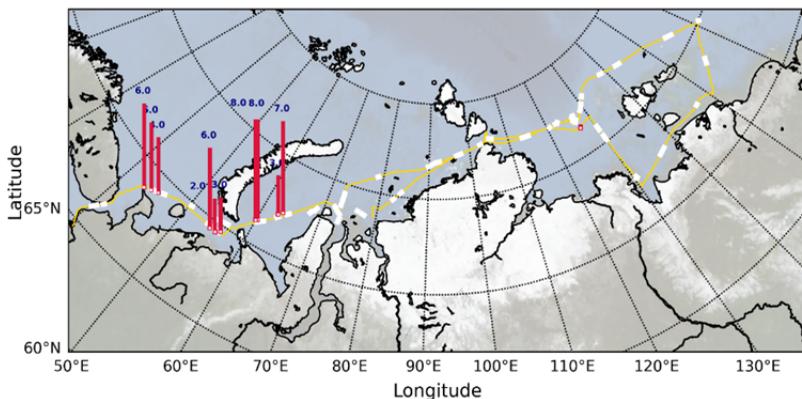


Рис. 1. Результаты наблюдений за пластиковым мусором. Желтой линией показан маршрут судна, белыми прямоугольниками – трансекты, на которых проводились наблюдения, красными столбцами – плотность пластикового мусора на трансектах (частицы/км<sup>2</sup>)

Мы предполагаем, что плавающий макромусор, как и микропластик, накапливаются в этой фронтальной зоне, затем переносятся на север вместе с плумовыми водами и, наконец, достигают районов ледообразования в северной части Карского моря. Главный вывод этого исследования состоит в том, что плавающий морской мусор был обнаружен только в воде атлантического происхождения, поступающей из Баренцева моря, где средняя плотность на наблюдаемых трансектах составляла 0,92 частиц/км<sup>2</sup>. Восточные части исследования, Карское море, море Лаптевых и Восточно-Сибирское море были практически свободны от плавающего мусора. Поступление с водами рек в осенний период представляется незначительным, по крайней мере, в осенний период.

*Эта работа частично финансировалась проектом Министерства климата и окружающей среды Норвегии RUS-19/0001 «Создание регионального потенциала для измерения и моделирования распределения и поступления микропластика в Баренцево море из рек и течений (ESCIMO)» и Российским фондом фундаментальных исследований, исследовательский проект 19-55-80004.*

#### **Список источников**

1. NOAA. Modeling Oceanic Transport of Floating Marine Debris. NOAA Marine Debris Program: 21. 2016.
2. PAME. Protection of the Arctic marine environment Desktop Study on Marine Litter Including Microplastics in the Arctic. 2019.
3. Guidance on Monitoring of Marine Litter in European Seas / F. Galgani, G. Hanke, S. Werner, L. Oosterbaan, P. Nilsson, D. Fleet, S. Kinsey, J. van Franeker, T. Vlachogianni, M. Scoullou, J. Mira Veiga, A. Palatinus, M. Matiddi, T. Maes, S. Korpinen, A. Budziak, H. Leslie, J. Gago, G. Liebez // European Commission, Joint Research Centre. MSFD Technical Subgroup on Marine Litter (TG ML). 2013. V. 26113. P. 1–126.
4. González-Fernández D., Hanke G. Toward a harmonized approach for monitoring of riverine floating macro litter inputs to the marine environment // *Frontiers in Marine Science*. 2017. V. 4. P. 1–7.

**DISTRIBUTION OF FLOATING MARINE MACRO-LITTER  
IN RELATION TO OCEANOGRAPHIC CHARACTERISTICS  
IN THE RUSSIAN ARCTIC SEAS**

**M.P. Pogojeva<sup>1,2</sup>, A.V. Berezina<sup>1,3</sup>, I.A. Zhdanov<sup>1</sup>, A.A. Osadchiev<sup>1</sup>,  
G. Hanke<sup>4</sup>, E.V. Yakushev<sup>1,5</sup>**

<sup>1</sup> *Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia, pogojeva\_maria@mail.ru*

<sup>2</sup> *N.N. Zubov State Oceanographic Institute, Roshydromet, Moscow, Russia*

<sup>3</sup> *St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

<sup>4</sup> *European Commission Joint Research Centre, Ispra, Italy*

<sup>5</sup> *Norwegian Institute for Water Research, Oslo, Norway*

**Abstract.** The main objectives of this work was the acquisition of new data on floating marine macro litter (FMML) and natural floating objects in the Arctic seas, an initial assessment of the level of pollution by FMML and an analysis of potential sources. The results of this study present the first data on FMML distribution in Russian Arctic shelf seas in relation to oceanographic conditions (i.e. position of water masses of different origin as described by temperature, salinity, dissolved oxygen and pH). The main finding of this study is that FMML was found only in the water of Atlantic origin, inflowing from the Barents Sea, where FMML average density on the observed transects was 0.92 items/ km<sup>2</sup>. Eastern parts of the study, Kara Sea, Laptev Sea and East Siberian Sea were practically free from FMML. The input from rivers appears to be negligible, at least in autumn.

**Keywords:** marine pollution, floating marine macro litter, Arctic, marine environmental monitoring

## ПИЩЕВЫЕ СТРАТЕГИИ ПРЕСНОВОДНЫХ РЫБ И ПОТРЕБЛЕНИЕ ИМИ МИКРОПЛАСТИКА

Н.Ю. Тропин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Вологодский филиал ФГБНУ «ВНИРО», Вологда, Россия,  
*nikolay-tropin1@yandex.ru*

<sup>2</sup> Томский государственный университет, Томск, Россия

**Аннотация.** Представлен краткий обзор результатов изучения содержания микропластика в пресноводных рыбах с разными пищевыми стратегиями. Полученные данные большинства натуральных исследований подтверждают влияние стратегии питания рыб на интенсивность накопления микропластика в желудочно-кишечном тракте.

**Ключевые слова:** пресные воды, микропластик, рыбы, пищевые стратегии, желудочно-кишечный тракт

Проблема загрязнения водных объектов микропластиком и выявление его негативного воздействия на гидробионтов в условиях динамичности водной среды относится к чрезвычайно важным и актуальным направлениям современной экологии [1, 2]. Повышенная устойчивость микропластиковых частиц к внешним факторам приводит к низкой скорости их деградации и длительному периоду полураспада, которые способствует поступлению и активной аккумуляции микропластика по трофическим цепям. При этом значительная часть работ по данному направлению направлена на детекцию и определение потенциальной биодоступности микропластика для организмов в условиях трофической сети, тем более что в морских экосистемах частицы микропластика были обнаружены в кишечнике ряда таксонов почти на каждом трофическом уровне [2]. В наибольшей степени кумулятивный эффект проявляется у рыб, которые находятся на вершинах трофических цепей, а также являются важнейшим биологическим ресурсом, используемым человеком. В этом отношении проблема исследования механизмов накопления микропластика тесно связана с оценкой качества рыбной продукции и поэтому активно изучается и обсуждается как зарубежными [3–5], так и отечественными исследователями [6]. В то же время работ, посвященных анализу содержания микропластика в пресноводных видах рыб с разной пищевой стратегией невелико [7–9]. Целью настоящего краткого обзора является анализ данных

по результатам изучения содержания частиц микропластика в пресноводных видах рыб с разными пищевыми стратегиями для обозначения перспектив и направлений дальнейших исследований.

Анализ литературы по содержанию микропластика в рыбах позволил установить, что в целом, по сравнению с морскими, пресноводные виды характеризуются относительно более высоким содержанием микропластиковых частиц в желудочно-кишечном тракте. Это связывается не со специфическими эколого-физиологическими особенностями пресноводных рыб, а скорее, с условиями обитания. При этом наиболее интенсивное накопление микропластика в рыбе происходит в водотоках, водосбор которых занимает весьма обширные площади с крупными антропогенными источниками первичного и вторичного микропластика [7–9]. Так, при исследовании содержания частиц микропластика в желудочно-кишечном тракте обыкновенного ельца (*Leuciscus leuciscus* L.) из р. Томь в Западной Сибири в среднем на одну особь рыб выявлено  $204 \pm 28,7$  ед. микропластика [7].

В ходе ряда исследований морских видов рыб была установлена взаимосвязь между типами питания литоральных рыб и вероятностью поглощения микропластика. Было убедительно показано, что наличие эврифагии у вида приводит к поглощению большего количества микропластика относительно видов фитофагов и хищников [5]. Кроме того, при сравнительном анализе содержания микропластика у рыб-хищников с таковым у зоопланктофагов и зообентофагов были получены результаты, подтверждающие увеличение содержания частиц микропластика в условиях неизбирательной стратегии питания.

На примере пресноводных рыб аналогичные данные были представлены в ходе изучения содержания микропластика в рыбе из трех основных притоков оз. Мичиган (США) [4]. Так, значительная степень корреляции между концентрацией микропластиковых частиц в желудочно-кишечном тракте и трофической группой рыб. Наиболее высоким содержанием микропластиковых частиц характеризовался представитель бычковых – *Neogobius melanostomus*, который является типичным зообентофагом. Кроме того, для данного вида была показана положительная линейная зависимость между размером тела и количеством частиц микропластика. При общем сравнительном анализе всех исследованных видов рыб было показано, что содержание микропластика достоверно выше у зообентофагов по сравнению с детритофагами и эврифагами, а у эврифагов – с детритофагами. Таким образом, в условиях притоков оз. Мичиган проявляется увеличение содержания микропластика у видов рыб с уменьшением избирательности в пита-

нии. Кроме того, была выявлена характерная особенность, связанная с вариабельностью концентрации микропластика в желудочно-кишечном тракте эврифагов в зависимости от гидрологических и экологических параметров участков того или иного водотока [4].

Исследования взаимосвязи между пищевыми стратегиями рыб и содержанием в них микропластика поднимаются и в экспериментальных работах [4]. В частности, при сравнении четырех видов рыб (*Oncorhynchus mykiss*, *Tymallus thymallus*, *Cyprinus carpio* и *Carassius carassius*) с разным стилем кормления с добавлением в корм микропластиковых частиц с разными концентрациями, в наибольшей степени меньше поглощали микропластик виды с выраженной хемосенсорной чувствительностью в условиях голодания.

Таким образом, по результатам проведенных исследований выявлено, что поступление микропластика в желудочно-кишечный тракт рыб в значительной степени определяется выбранной пищевой стратегией. Исследование механизмов и закономерностей этого процесса, а также расширение видового списка изучаемых представителей ихтиофауны в разнотипных пресноводных объектах являются перспективными направлениями исследования содержания микропластика в рыбе.

#### Список источников

1. Anderson J.C., Park B.J., Palace V.P. Microplastics in aquatic environments: implications for Canadian ecosystems. // Environmental Pollution. 2016. V. 218.
2. Bellasi A., Binda G., Pozzi A., Galafassi S., Volta P., Bettinetti R. Microplastic contamination in freshwater environments: a review, focusing on interactions with sediments and benthic organisms. // Environments. 2020. V. 7. 30.
3. Capone A., Petrillo M., Mistic C. Ingestion and elimination of anthropogenic fibres and microplastic fragments by the European anchovy (*Engraulis encrasicolus*) of the NW Mediterranean Sea. // Mar Biol. 2020. V. 167. 166.
4. McNeish R.E., Kim L.H., Barrett H.A. et al. Microplastic in riverine fish is connected to species traits. // Sci Rep. 2018. V. 7. 11639.
5. Wang W., Ge J., Yu X. Bioavailability and toxicity of microplastics to fish species: a review. // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2000. V. 189. 109913.
6. Гущин А.В., Веремейчик Я.В. Микропластик в пище балтийской песчанки *Ammodytes tobianus* литорали Куршской косы Балтийского моря // Вопросы ихтиологии. 2019. № 4. С. 492–496.
7. Frank Y.A., Vorobiev E.D., Babkina I.B., Antsiferov D.V., Vorobiev D.S. Microplastics in fish gut, first records from the Tom River in West Siberia, Russia // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2020. № 52. С. 130–139.

8. Wong J.K.H, Lee K.K, Tang K.H.D, Yap P-S. Microplastics in the freshwater and terrestrial environments: Prevalence, fates, impacts and sustainable solutions // Science of the Total Environment. 2020. V. 719. 137512.
9. Eriksen M., Mason S., Wilson S., Box C., Zellers A., Edwards W., Farley H., Amato S. Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian Great Lakes. // Marine Pollution Bulletin. 2013. V. 77. P. 177–182.
10. Castro-Castellon A.T., Horton A.A., Hughes J.M.R. et al. Ecotoxicity of microplastics to freshwater biota: considering exposure and hazard across trophic levels. // Science of the Total Environment. 2021. V. 816. 151638.

## FEEDING STRATEGIES IN FRESHWATER FISH AND MICROPLASTIC CONSUMPTION

N.Y. Tropin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Vologda Branch of the Federal State Budget Scientific Institution  
«Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography», Vologda,  
Russia, nikolay-tropin1@yandex.ru*

<sup>2</sup> *Tomsk State University, Tomsk, Russia*

**Abstract.** A brief review of the results of studying the content of microplastics in freshwater fish with different feeding strategies is presented. The data obtained from most field studies confirm the influence of the fish feeding strategy on the intensity of microplastic accumulation in the gastrointestinal tract.

**Keywords:** freshwater, microplastics, fish, feeding strategy, gastrointestinal tract

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ КЕРНА ЛЬДА ИЗ БУХТЫ НОВИК (ЯПОНСКОЕ МОРЕ)

О.И. Лобчук<sup>1</sup>, А.Ю. Лазарюк<sup>2</sup>, И.П. Чубаренко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ИО РАН, Москва, Россия, [olga\\_may87@mail.ru](mailto:olga_may87@mail.ru)

<sup>2</sup> ТОИ ДВО РАН, Владивосток, Россия

**Аннотация.** В работе мы идентифицировали частицы микропластика в керне льда, собранного в отдаленном и нетронутом месте бухты Новик (Японское море, Тихий океан). Используя оптическую микроскопию и  $\mu$ -рамановскую спектроскопию, мы визуализировали и идентифицировали частицы микропластика различных размеров, цветов и материалов.

**Ключевые слова:** лед, микропластик, лед, загрязнение, Японское море

В работе [1] представлены первые свидетельства наличия частиц МП в образцах морского льда из Чукотского моря и моря Бофорта: все четыре исследованные колонки (взятые на станциях, разделённых сотнями километров) содержали частицы МП в концентрации от 38 до 234 штук на кубометр льда, что на несколько порядков больше концентраций МП в водах Атлантики к северу от Шотландии (0,34 частицы на кубометр воды или в водах субтропического круговорота в северной части Тихого океана (0,12 частицы на кубометр воды [1]). В этой же статье [1] предположили, что частицы сложных форм и частицы легче воды должны бы лучше захватываться при замерзании льда, чем частицы песка и глины. Подобные же данные были получены в лаборатории Helmholtz Centre for Polar and Marine Research (Германия): в образцах льда из пролива Фрама (между Гренландией и Шпицбергенем) концентрации МП составили в среднем  $2 \times 10^6$  частиц на кубометр для пакового льда и  $6 \times 10^5$  частиц на кубометр припая. Подавляющее большинство частиц были сделаны из полиэтилена (плотность 0,87–0,93 г см<sup>3</sup>), причём если в образце пакового льда максимум загрязнения приходился на верхние 18 см (из 166 см длины керна), то в верхних 28 см (из 145 см) припая частиц МП не обнаружено вообще. В целом, эти данные можно рассматривать как индикатор повышенной (по сравнению с водной толщей) концентрации частиц МП, аналогично тому, как она повышена и в донных осадках. Количественные же оценки на базе этих данных пока ненадёжны, поскольку в

сумме у двух авторов имелось только 6 кернов, причём методика обработки образцов и идентификации МП различались.

В нашей работе исследовались керны льда, взятого в бухте Новик (Амурский залив, Японское море). Все керны отбирались одновременно и по методике [2]. Анализ обработки фильтров на микроскопе показал, что концентрация МП составила: медиана 285 (диапазон 172–298) шт./л, среднее ( $\pm$ стандартное отклонение)  $265 \pm 75$  шт./л, из них фрагменты имели концентрацию  $3 \pm 11$  шт./л, пленки  $103 \pm 69$  шт./л, волокна  $159 \pm 99$  шт./л.

Визуально определялась форма, размер и цвет МП. Извлеченные МП классифицированы, как фрагменты, пленки и волокна, согласно [3, 4]. Среди извлеченных 1949 частиц, волокна оказались наиболее распространенной формой МП (59%), за которыми фрагменты (39%) и пленки (2%).

Анализ распределения частиц по размерам показал, что наибольшее количество частиц имеет размеры 1–2 мм (37%), меньшее количество частиц имеет размеры 2–5 мм (27%), затем 0,3–1 мм (18%), затем < 0,3 мм (14%) и > 5 мм 4%. Наибольшее количество фрагментов и волокон в размерном диапазоне 1–2 мм, пленок в размерном диапазоне 2–5 мм. Волокна и фрагменты встречались во всех образцах, пленки на нескольких горизонтах отсутствовали.

По цвету частицы разделены на следующие категории: синие, черные, желтые, красные, голубые, зеленые, розовые, фиолетовые, оранжевые, зебры голубая и синяя [4–6]. Прозрачные и белые нити не вошли в результаты, представленные в отчете, но фиксировались для сравнения с дальнейшим спектроскопическим анализом.

Извлечение частиц из ледовых фильтров – объективно сложная процедура. Поврежденные и хрупкие частицы МП под действием природных факторов и биоты, сложны в определении. Спектроскопический анализ не позволяет определить вид некоторых образцов (примерно 20%) из-за слабого сигнала, вызванного, например, синтетическими красителями, или из-за сильной фоновой флуоресценции.

#### Список источников

1. Obbard R., Sadri S., Wong Y.Q., Khitun A.A., Baker I., Thompson R.C. Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice // *Earth's Future*. 2014. V. 2. P. 315–320.
2. Лобчук О.И., Лазарюк А.Ю., Чубаренко И.П. Микропластик в керне льда бухты Новик (Амурский залив, японское море) // *Комплексные исследова-*

- ния Мирового океана. М. : Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, 2021. С. 470–471.
3. Chubarenko I., Esiukova E., Bagaev A., Isachenko I., Demchenko N., Zobkov M., Efimova I., Bagaeva M., Khatmullina L. Behavior of microplastics in coastal zones, In: *Microplastic Contamination in Aquatic Environments* // Elsevier Pages. 2018. P. 175–223.
  4. Esiukova E., Zobkov M., Chubarenko I. Data on microplastic contamination of the Baltic Sea bottom sediment samples in 2015–2016 // *Data in brief*. 2020. V. 28. 104887.
  5. Yan M., Nie H., Xu K., He Y., Hu Y., Huang Y., Wang J. Microplastic abundance, distribution and composition in the Pearl River along Guangzhou city and Pearl River estuary, China. // *Chemosphere*. 2019. V. 217. P. 879–886.
  6. Zhang C., Zhou H., Cui Y., Wang C., Li Y., Zhang D. Microplastics in offshore sediment in the Yellow Sea and East China Sea, China // *Environmental pollution*. 2019. V. 244. P. 827–833.

## RESULTS OF ICE CORE PROCESSING FROM NOVIK BAY (SEA OF JAPAN)

O.I. Lobchuk<sup>1</sup>, A.Yu. Lazaryuk<sup>2</sup>, I.P. Chubarenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> IO RAS, Moscow, Russia, [olga\\_may87@mail.ru](mailto:olga_may87@mail.ru)

<sup>2</sup> POI FEB RAS, Vladivostok, Russia

**Abstract.** In this work, we identified microplastic particles in an ice core collected from a remote and untouched location in Novik Bay (Sea of Japan, Pacific Ocean). Using optical microscopy and  $\mu$ -Raman spectroscopy, we have visualized and identified microplastic particles of various sizes, colors and materials.

**Keywords:** microplastics, ice, pollution, Sea of Japan

**ВЛИЯНИЕ МИКРОЧАСТИЦ ПОЛИСТИРОЛА  
НА МОРФОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ  
*DAPHNIA MAGNA***

**О.В. Никитин<sup>1</sup>, Э.И. Насырова<sup>1</sup>, Р.С. Кузьмин<sup>2</sup>,  
Л.М. Миннегулова<sup>3</sup>, В.З. Латыпова<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия,  
olnova@mail.ru

<sup>2</sup> ООО «Экоаудит», Казань, Россия, ecotexp@yandex.ru

<sup>3</sup> Центр детского творчества «Танкодром», Казань, Россия,  
lyalya250505@mail.ru

**Аннотация.** Представлены результаты лабораторного моделирования влияния микрочастиц полистирола на *Daphnia magna*. LC<sub>50</sub> (48 ч) составила 197,35 мг/л или 78,94 мг/л, при учете фракции до 50 мкм. Влияние на морфометрические параметры *D. magna* обнаружено не было. Скорость плавания была максимальной (0,87 см/с) в контрольных условиях. Внесение микропластика в концентрациях 50, 125 и 200 мг/л существенно (на ~43%) снизило скорость плавания дафний. Трофическая активность (96% в контрольных условиях) понижалась при внесении микропластика, достигая 19% при максимальной концентрации.

**Ключевые слова:** микропластик, полистирол, *Daphnia magna*, токсичность, морфофункциональные показатели

Исследования последних лет показали, что частицы микропластика широко распространены в поверхностных водах и донных отложениях в различных пресноводных экосистемах [1–3]. Частицы могут оказывать комплексное негативное воздействие, включая механизмы физического и химического действия [4]. Учитывая уникальные свойства микропластика (малый размер и большая удельная площадь поверхности), следует уделить больше внимания их воздействию на организмы. В недавних исследованиях сообщалось о токсичности микропластика для пресноводных организмов [5], но знания об их биологическом воздействии ограничены, противоречивы и требуют дальнейших исследований [6].

В данной работе мы исследовали влияние частиц микропластика на морфофункциональные показатели *Daphnia magna* Straus, 1820 (выживаемость, размерные характеристики, двигательная и трофическая активность). Дафнии имеют небольшой размер тела, широкое географи-

ческое распространение и являются одним из ключевых элементов пресноводных сообществ гидробионтов. *D. magna* – неселективный фильтратор, в естественных условиях находится в толще воды и может поглощать частицы микропластика вместе со своим основным питанием (фитопланктоном).

Полистирол является одним из наиболее часто используемых пластиковых полимеров во всем мире [1]. Также именно полистирол в настоящее время является доминирующим полимером при проведении экотоксикологических экспериментов [7].

*Методы исследования.* Для экспериментов использовали лабораторную культуру *D. magna*, выращиваемую в соответствии с ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.12–06. Эксперименты проводили в условиях лабораторного моделирования.

Измерения линейных размеров особей *D. magna* проводили при помощи светового микроскопа Биомед-5 с использованием окулярного микрометра.

Оценку токсичности микрочастиц полистирола проводили в остром опыте (48 ч) по смертности *D. magna*. Для оценки LC<sub>50</sub> использовали пробит-анализ зависимости доза-эффект при помощи программы MedCalc 20.

Оценку влияния частиц полистирола на двигательную активность *D. magna* осуществляли через 24 ч по изменению скорости плавания организмов, при помощи анализатора токсичности TrackTox, реализующего алгоритмы компьютерного зрения [8].

Оценку трофической активности дафний проводили по степени снижения концентрации корма в среде с рачками при 24 ч экспозиции (по флуоресценции клеток водорослей *Chlorella vulgaris*, на приборе Фотон-10). Показатели трофической активности рассчитывали по формуле [9].

Статистическую обработку данных производили при помощи программы Statistica 12.

В экспериментах использовался пищевой полистирол, измельченный до микроскопических размеров. Размерные характеристики полученных частиц микропластика были установлены при помощи лазерного дифракционного анализатора размера частиц Hydro 2000S. Химический анализ, подтверждающий отнесение частиц к полистиролу, выполнен на ИК-Фурье спектрометре FT-801.

Была выполнена серия экспериментов с частицами микропластика полистирола (размеры частиц: ~5% < 10 мкм, ~40% < 50 мкм, ~75% < 100 мкм), доступными для поглощения дафниями.

*Результаты.* В остром токсикологическом эксперименте исследовали влияние частиц в концентрациях: 0 (контроль), 10, 50, 125 и 200 мг/л. Полученные данные по выживаемости дафний на вторые сутки позволили определить полулетальную концентрацию  $LC_{50}$  для микрочастиц полистирола, составившую 197,35 мг/л, с границами 95% доверительного интервала (ДИ) 163,10–259,98 мг/л. Если принять во внимание, что дафнии преимущественно поглощают пищевые частицы в размерном диапазоне до 50 мкм [10], можно скорректировать указанные значения  $LC_{50}$ : 78,94 мг/л (95% ДИ: 65,32–103,99 мг/л). Полученные значения согласуются с порядком соответствующих величин для полимерных микрочастиц, известных из литературы [4, 11].

Измерение линейных размеров дафний после 48 ч экспозиции в средах с концентрациями микропластика: 0 (контроль), 10, 50, 125 и 200 мг/л не выявило влияния микропластика на морфометрические параметры – размер особей дафний во всех концентрациях сохранялся постоянным и в среднем составлял  $1,75 \pm 0,01$  мм. По-видимому, решение этой задачи требует большего времени экспозиции.

Эксперименты по оценке влияния частиц полистирола на двигательную активность дафний показали, что скорость плавания была максимальной в контрольных условиях, в среднем составляя  $0,87 \pm 0,10$  см/с. Внесение в среду частиц микропластика в концентрациях 50, 125 и 200 мг/л статистически значимо снизило (на ~44%,  $p < 0,01$ ) скорость плавания дафний. Средняя скорость плавания в этих условиях составляла  $0,50 \pm 0,05$ ,  $0,46 \pm 0,04$  и  $0,50 \pm 0,04$  см/с соответственно. Значимых различий по скорости плавания дафний в контрольных условиях и при наличии частиц микропластика в концентрации 10 мг/л не наблюдалось.

Негативное влияние на двигательную активность, возможно, связано с адгезией частиц микропластика на органах локомоции и поверхности карапакса дафний (отмечалось в ходе микроскопирования), что могло приводить к большему сопротивлению воды при их движении.

Эксперименты по оценке влияния микрочастиц полистирола на трофическую активность дафний проводили в концентрациях 0 (контроль), 10, 50 и 200 мг/л. При 24 ч экспозиции трофическая активность дафний составляла 96%, т.е. дафнии практически полностью выедали водоросль из культуральной среды. В эксперименте с микропластиком в концентрации 50 мг/л трофическая активность снижалась незначительно и составляла 86%, а при концентрации 200 мг/л снижалась существенно (примерно в 5 раз) – до 19%.

Снижение трофической активности можно связать с тем, что частицы микропластика поступают в пищеварительную систему дафний

и тем сильнее, чем выше их концентрация в среде. Микропластик при высоких концентрациях в среде может приводить к замещению водорослевых клеток преимущественно частицами полистирола в пищеварительной системе дафний.

Таким образом, наша гипотеза о том, что частицы микропластика полистирола могут влиять на морфофункциональные показатели *D. magna*, в целом нашла экспериментальное подтверждение. В ходе выполненных исследований показано значимое влияние частиц полистирола микроскопического размера на рассматриваемые показатели *D. magna* – выживаемость, двигательную и трофическую активность. Безусловно, лабораторные исследования биологического воздействия микропластика на дафний не позволяют в полной мере предсказать реакции в естественных условиях, однако могут позволить лучше понять возможные механизмы воздействия.

#### Список источников

1. Koelmans A.A., Mohamed Nor N.H., Hermsen E., Kooi M., Mintenig S.M., De France J. Microplastics in freshwaters and drinking water: critical review and assessment of data quality // *Water Research*. 2019. V. 155. P. 410–422.
2. Никитин О.В., Латыпова В.З., Ашихмина Т.Я., Кузьмин Р.С., Насырова Э.И., Харипов И.И. Микроскопические частицы синтетических полимеров в пресноводных экосистемах: изученность и современное состояние // *Теоретическая и прикладная экология*. 2020. № 4. С. 216–222.
3. Frank Y.A., Vorobiev E.D., Vorobiev D.S., Trifonov A.A., Antsiferov D.V., Hunter T.S., Wilson S.P., Strezov V. Preliminary screening for microplastic concentrations in the surface water of the Ob and Tom rivers in Siberia, Russia // *Sustainability (Switzerland)*. 2021. V. 13. P. 1–14.
4. da Costa J.P., Duarte A.C., Rocha-Santos T.A.P. Microplastics – occurrence, fate and behaviour in the environment // *Comprehensive Analytical Chemistry*. 2017. V. 75. P. 1–24.
5. Liu Z., Yu P., Cai M., Wu D., Zhang M., Huang Y., Zhao Y. Polystyrene nanoplastic exposure induces immobilization, reproduction, and stress defense in the freshwater cladoceran *Daphnia pulex* // *Chemosphere*. 2019. V. 215. P. 74–81.
6. Chae Y., An Y.-J. Effects of micro- and nanoplastics on aquatic ecosystems: current research trends and perspectives // *Marine Pollution Bulletin*. 2017. V. 124. P. 624–632.
7. Schwarzer M., Brehm J., Vollmer M., Scheibel T., Laforsch C. Shape, size, and polymer dependent effects of microplastics on *Daphnia magna* // *Journal of Hazardous Materials*. 2022. V. 426. 128136.
8. Nikitin O. Aqueous medium toxicity assessment by *Daphnia magna* swimming activity change // *Advances in Environmental Biology*. 2014. Vol. 8(13). P. 74–78.

9. Shashkova T.L., Grigor'ev Y.S. Impact of heavy metals on the trophic activity of daphnia depending on feeding conditions and age of crustaceans // Contemporary Problems of Ecology. 2013. V. 6. P. 662–666.
10. Ebert D. Ecology, epidemiology, and evolution of parasitism in Daphnia. Bethesda (MD): National Library of Medicine (US). // National Center for Biotechnology Information. 2005. P. 7.
11. Eltemsah Y.S., Bøhn, T. Acute and chronic effects of polystyrene microplastics on juvenile and adult *Daphnia magna* // Environmental Pollution. 2019. V. 254. 112919.

## **EFFECTS OF POLYSTYRENE MICROPARTICLES ON THE MORPHOFUNCTIONAL PARAMETERS OF *DAPHNIA MAGNA***

**O.V. Nikitin<sup>1</sup>, E.I. Nasyrova<sup>1</sup>, R.S. Kuzmin<sup>2</sup>, L.M. Minnegulova<sup>3</sup>,  
V.Z. Latypova<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Kazan Federal University (Kazan, Russia), olnova@mail.ru*

<sup>2</sup> *Ecoaudit LLC (Kazan, Russia), ecotexp@yandex.ru*

<sup>3</sup> *Center for Children's Creativity "Tankodrom" (Kazan, Russia),  
lyalya250505@mail.ru*

**Abstract.** The results of laboratory modeling of the effect of polystyrene microparticles on *Daphnia magna* are presented. LC<sub>50</sub> (48 h) was 197.35 mg/L or 78.94 µg/L, taking into account the fraction up to 50 µm. No effect on the morphometric parameters of *D. magna* was found. Swimming speed was maximum (0.87 cm/s) under control conditions. The addition of microplastics at concentrations of 50, 125, and 200 mg/L significantly (by ~43%) reduced the swimming speed of *Daphnia*. Trophic activity (96% under control conditions) decreased with the addition of microplastics, reaching 19% at the maximum concentration.

**Keywords:** microplastics, polystyrene, *Daphnia magna*, toxicity, morphofunctional parameters

## МОНИТОРИНГ МОРСКОГО МУСОРА НА ПЛЯЖАХ И В ВОДНОЙ ТОЛЩЕ В РОССИЙСКОЙ ЧАСТИ ФИНСКОГО ЗАЛИВА

А.А. Ершова, Т.Р. Ерёмина

*Российский государственный гидрометеорологический университет,  
ПластикЛаб, Санкт-Петербург, Россия, ershova@rshu.ru*

**Аннотация.** Летние мониторинговые исследования РГГМУ показали, что загрязнение пляжей и водной среды Невской губы и Финского залива микропластиком и пластиковым мусором является значимой экологической проблемой, а уровни концентрации микропластика здесь являются самыми высокими в регионе Балтийского моря. Показано, что Невская губа служит аккумулятором мусора и микропластика как за счет антропогенных (высокая плотность населения), так и естественных (речной сток, преобладающие ветра и течения) факторов.

**Ключевые слова:** морской мусор, микропластик, Финский залив

Одним из наиболее изученных морей в мире по уровню загрязнения морским мусором и микропластиком является Балтийское море и его побережья: в Финском заливе исследования ведутся с 2018 г. Российским государственным гидрометеорологическим университетом (лабораторией ПластикЛаб). Работа РГГМУ направлена на отработку методических подходов к мониторингу микропластика, исследование распространения частиц в водной среде залива, а также создание первой базы данных по морскому мусору в российском секторе Балтики, которая насчитывает более 1 400 единиц данных измерений с покрытием более чем 4500 м<sup>2</sup> площади побережий [2].

На данный момент стандартизированных методов для системы мониторинга морского мусора и микропластика не существует ни в России, ни в мире в целом. В РГГМУ ведется разработка приборной и лабораторной базы для мониторинга микропластика в водной среде: разработана собственная проточная система для отбора проб микропластика (для судовых измерений), а также серия автономных мобильных фильтровальных систем «HydroPuMP» (HydroPump for MicroPlastics), на одну из которых в 2019 г. получен патент. Цель работы – выработка доступного и вместе с тем унифицированного подхода к мониторингу микропластика в России, что крайне важно для возможности сравнения получаемых данных с данными международных исследований. На основе полученных результатов исследований РГГМУ разработаны

рекомендации для национальной программы мониторинга морского мусора и микропластика, согласованные с международными программами мониторинга в Балтийском регионе в рамках рабочей группы ХЕЛКОМ по морскому мусору.

Мониторинг РГГМУ проводится с 2018 г. на 15 песчаных пляжах вдоль побережья Финского залива и Невской губы – уникального водоема, являющегося техногенной лагуной и эстуарием р.Нева: станции ежегодного мониторинга удовлетворяют международным подходам. Показано, что все побережья Финского залива и Невской губы загрязнены пластиковым мусором всех фракций – от макро- до микромусора. Наиболее загрязненным является пляж в центре города прямо у места впадения одного из крупнейших рукавов р. Нева в Невскую губу. Средне-загрязненные пляжи также расположены в черте города на побережьях Невской губы. Наименее загрязненные пляжи находятся либо за пределами Невской губы, либо на значительном удалении от центра Санкт-Петербурга (рис. 1).

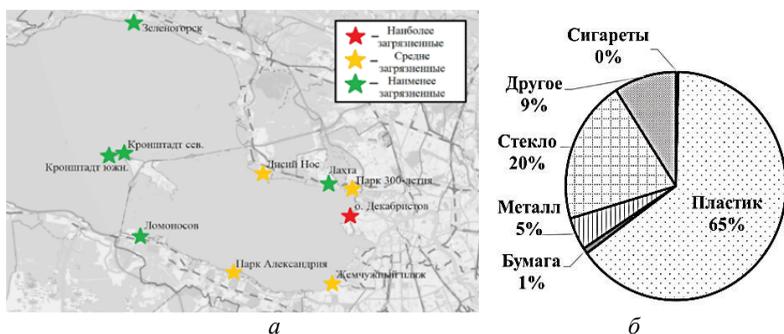


Рис. 1. Классификация пляжей Финского залива и Невской губы по степени загрязненности микромусором (частицами менее 5 мм) (а) и состав микромусора на исследованных пляжах в 2019–2020 гг. (б) [1]

Преобладающим видом антропогенного пляжного мусора являются бытовые пластиковые отходы, поступающие с неочищенными и недостаточно очищенными сточными водами, и стоком реки Невы. Главные категории антропогенного мусора: ватные палочки, окурки, гранулы и пеллеты различных цветов, синтетические салфетки и другие фрагменты пластика, а также битое стекло и кусочки ржавого металла.

За весь период исследований 2020 г. выделяется наименьшим количеством микромусора на пляжах, что, вероятно, связано с периодом пандемических ограничений и остановкой многих производств в реги-

оне в 2020 г. Концентрации микропластика в воде в 2020 г. составляли 330–1300 част./м<sup>3</sup>, преобладают микроволокна размером 150–3500 мкм. Нитевидные пластиковые волокна образуются в результате отслаивания синтетических волокон при стирке белья и могут попадать в водную среду с очищенными коммунально-бытовыми сточными водами, а также в результате разрушения рыболовных лесок и снастей. Максимальные концентрации микрочастиц в воде обнаружены в центре города и вблизи выходов очистных сооружений, что подтверждает ведущую роль такого рода объектов в загрязнении микропластиком водной среды вблизи крупных городов. При этом значительная доля частиц представлена разного рода пленками и фрагментами пластика самых разных цветов и форм (рис. 2), что говорит о большом разнообразии источников загрязнения залива пластиковым мусором.

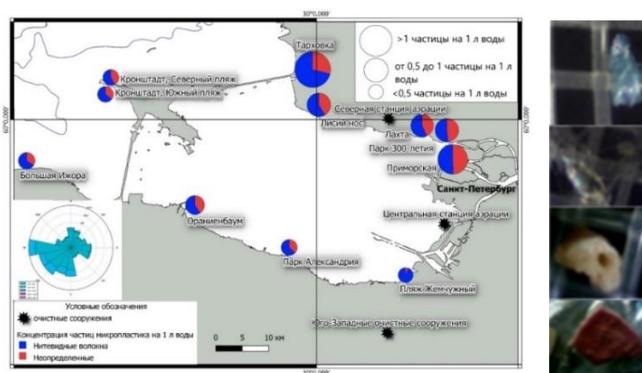


Рис. 2. Количество микропластиковых частиц в водной толще (част./л) в Невской губе в 2020 г. (слева представлена роза ветров в наблюдаемый период) и виды микропластика Невской губы (пленки – голубая и прозрачная, кусочек пенопласта, фрагмент пластика)

Для понимания источников загрязнения важно учитывать не только антропогенные источники загрязнения, но и природные особенности водоема. Для Невской губы были установлены закономерности распределения морского мусора в зависимости от экспозиции берегов, удаленности от комплекса защитных сооружений, выпусков очистных сооружений, от устья реки Невы, а также от других особенностей побережья. Северное побережье Финского залива и Невской губы загрязнено микропластиком сильнее, чем южное, а в целом концентрации микропластика здесь самые высокие в балтийском регионе. В силу своих гидродинамических особенностей Невская губа является аккумулятором

мулятором микропластиковых частиц, поступающих со стоком реки Нева, и далее, за Комплексом защитных сооружений концентрации микропластика значительно снижаются.

Показана согласованность данных о содержании микропластика на побережье и в толще воды: тренды изменения концентрации на побережьях соответствуют таковым в водной среде. Это может свидетельствовать о согласованности самих применяемых методов отбора проб и условий проведения полевых исследований: замеры проводились только в безветренную погоду, при отсутствии ветра и волнения, во избежание дополнительного взмучивания воды, причем отбор проб как морской воды, так и на пляже проводились на одних и тех же станциях мониторинга в одно и то же время.

Проведенные РГГМУ исследования также показывают значительную изменчивость концентраций и условий формирования микропластиковой нагрузки на пляжи, для более детального изучения которой очевидно необходимы более частые исследования с учетом сезонов года и гидрометеорологических явлений.

#### Список источников

1. Кузьмина А.С., Ершова А.А. Загрязнение микрочастицами морского мусора песчаных побережий восточной части Финского залива Балтийского моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 2.
2. Ershova A.A., Eremina T.R., Chubarenko I.P., Esiukova E.E. Marine litter in the Russian Gulf of Finland and South-East Baltic: application of different methods of beach sand sampling // The Handbook of Environmental Chemistry. 2021. P. 461–485.

### MONITORING OF MARINE LITTER ON THE BEACHES AND IN THE WATER COLUMN IN THE RUSSIAN PART OF THE GULF OF FINLAND

A.A. Ershova, T.R. Eremina

*Russian State Hydrometeorological University, PlasticLab, St. Petersburg, Russia,  
ershova@rshu.ru*

**Abstract.** Summer monitoring studies of the Russian State Hydrometeorological University showed that contamination of the beaches and the water environment of the Neva Bay and the Gulf of Finland with microplastics and plastic litter is a significant environmental problem, and microplastic concentration levels here are the highest in the Baltic Sea region. Study showed that the Neva Bay serves as an accumulator of microlitter and microplastics due to both anthropogenic (high population density) and natural (river runoff, prevailing winds and currents) factors.

**Keywords:** marine debris, microplastics, Gulf of Finland.

## ОСОБЕННОСТИ ДЕТЕКЦИИ МИКРОПЛАСТИКА В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ

И.Н. Макеева, А.А. Ершова

*Российский государственный гидрометеорологический университет,  
ПластикЛаб, Санкт-Петербург, Россия, Zelsl@mail.ru*

**Аннотация.** Загрязнение микропластиковыми частицами донных отложений в морях и пресноводных водоемах на сегодняшний день изучено слабо. Отсутствие универсального метода измерений не дает возможности оценить уровень загрязнения Мирового океана. Проведен сравнительный анализ существующих методик и подходов обработки проб донных отложений, выявлены отличия лабораторного исследования образцов.

**Ключевые слова:** микропластик, донные отложения, методы лабораторной обработки

Водные массы в морских и пресноводных водоемах свободно переносят в себе частицы микропластика, которые имеют разный размер, плотность и форму и поэтому ведут себя по-разному в окружающей среде. Пластиковый микромусор, находясь в водной толще, может разрушаться на более мелкие частицы или со временем опускаться на дно водного объекта, что позволяет ему накапливаться в донных отложениях, и именно этот фактор влияет на достаточно высокие концентрации микропластика на дне водоемов. На сегодняшний день одной из главных проблем исследования загрязнения микропластиком донных отложений является отсутствие единой международной методики, которая бы подходила для всех типов грунтов и имела наименьшие потери исследуемого материала.

Основной целью данного исследования является проведение сравнительного анализа существующих международных подходов к обработке проб донных отложений, анализ основных проблем при их исследовании и проведение экспериментального исследования по определению микрочастиц в грунте с использованием разных подходов в лабораторной обработке.

На сегодняшний день подход к обработке проб донных отложений выбирается в зависимости от поставленной задачи, метода отбора материала и оснащения лаборатории, в которой будет проводиться его обработка. Некоторые лаборатории производят отбор проб донных

отложений с помощью грунтового бура получая столбец в виде керна с ненарушенной вертикальной структурой, что в последствии позволяет разделять его на секции и отделять микропластик от тяжелых частиц с помощью центрифугирования [1] или методом влажного просеивания через системы сит с разным размером ячеек [2]. Существуют более простые методы отбора проб, например, с помощью дночерпателей (Ван Вина, Окмана Берджа и др.). При данном методе отбора невозможно выделить какой-то отдельный пласт грунта, так как при отборе вертикальная структура сильно нарушается. Вследствие этого получают определенный объем донных отложений, в котором измеряют концентрацию частиц микропластика. После отбора проб грунта в лабораторных условиях всегда присутствует этап плотностного разделения исследуемых пластиковых частиц от тяжелых частиц грунта [1–3].

В 2021 г. в рамках международного трехстороннего сотрудничества между Россией, Финляндией и Эстонией под руководством Финского института окружающей среды (SYKE) несколькими лабораториями региона Финского залива (РГГМУ и Институт озероведения РАН от России) был проведен сравнительный анализ методик лабораторного анализа микропластика в пробах грунта Финского залива. В целом, проведенное исследование показало высокую сходимость результатов разных лабораторий: количество восстановленных частиц в пробах грунта было определено с достаточно высокой точностью всеми лабораториями, применявшими при этом разные подходы к лабораторной обработке. Подходы отличались, в частности, методами и реактивами для плотностного разделения, применяемыми лабораторными инструментами, а также методами полимерной идентификации частиц. Однако, результаты показали, что некоторые подходы дают большие потери образца. В рамках международного сличительного эксперимента (интеркалибрации) именно использование разной посуды оказалось вероятно самым важным фактором, определяющим максимальные расхождения результатов между лабораториями.

В связи с этим в рамках настоящей работы проведен дополнительный эксперимент для сравнения методик, которые дают наибольший разброс значений. Для проведения данного исследования были обработаны пробы донных отложений, отобранных в северной и южной части Ладожского озера в летний период 2021 г. (в рамках второго сличительного эксперимента с лабораторией Института озероведения РАН). 3 пробы состояли из двух видов грунта: песчаные и илистые. Из каждой пробы выделялась аликвота массой 100 г для каждого метода исследования. В пробы добавлялись восстановленные полисти-

рольные частицы размером 355–425 мкм (20 шт.), количество которых подсчитывалось на каждом этапе обработки образцов.

Для эксперимента выбраны два подхода, отличающиеся способами проведения плотностного разделения, а именно использование разной лабораторной посуды: делительной воронки (рис. 1) и термохимического стакана.



Рис. 1. Процесс обработки донных отложений с помощью делительной воронки

Лабораторная обработка пробы грунта состоит из нескольких стандартных этапов:

1. Контроль загрязнения материалов и химических реактивов.
2. Плотностное разделение.
3. Термохимическая обработка для очистки пробы от органического материала.
4. Визуальный подсчет микропластиковых частиц с помощью стереоскопического микроскопа.
5. Качественный анализ образцов (полимерная идентификация).

В результате проведённой работы будет представлено процентное соотношение потерь исследуемого материала при обработке проб донных отложений разными подходами. Это позволит выявить наиболее перспективный метод исследования загрязнения грунта микропластиковыми частицами.

#### Список источников

1. Willis K., Eriksen R., Wilcox C., Hardesty B. D. Microplastic Distribution at Different Sediment Depths in an Urban Estuary // *Frontiers in Marine Science*. 2014. V. 4. P. 1–8.

2. Van Cauwenberghe L., Vanreusel A., Mees J., Janssen C. R. Microplastic pollution in deep-sea sediments // *Environmental Pollution*. 2013. V. 182. P. 495–499.
3. Зобков М. Б., Есюкова Е. Е. Микропластик в морской среде: обзор методов отбора, подготовки и анализа проб воды, донных отложений и береговых наносов // *Океанология*. 2018. Т. 58, № 1. С. 149–157.

## **FEATURES OF MICROPLASTIC DETECTION IN BOTTOM SEDIMENTS**

**I.N. Makeeva, A.A. Ershova**

*Russian State Hydrometeorological University, PlasticLab, St. Petersburg, Russia,  
Zelsl@mail.ru*

**Abstract.** Pollution by microplastic particles of bottom sediments in the seas and freshwater reservoirs has been poorly studied to date. The lack of a universal measurement method makes it impossible to assess the level of pollution in the World Ocean. A comparative analysis of existing methods and approaches for processing samples of bottom sediments has been carried out, and differences in the laboratory study of samples have been identified.

**Keywords:** Microplastics, bottom sediments, laboratory processing methods

## ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ МИКРОПЛАСТИКА В ВОДАХ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ: РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА 2019–2020 ГГ.

**А.П. Педченко**

*ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии («ВНИРО»), Москва, Россия, [app3960@yandex.ru](mailto:app3960@yandex.ru)*

**Аннотация.** В августе-октябре 2019-2020 гг. ФГБНУ «ВНИРО» провел исследования загрязнения микропластиком вод Арктических морей. В мористой и мелководной частях шельфа нейстонной сетью «Манта», оснащенной счетчиком протока воды, собрано 65 проб, из которых 37% – в Чукотском, 29% – в Карском, 20% – в Восточно-Сибирском, 11% – в Лаптевых и 3% – в Баренцевом море. Количественные оценки собранных проб и идентификация частиц позволяют говорить о низкой степени загрязнения микропластиком поверхностных вод морей российской части Арктики по сравнению с другими районами Мирового океана.

**Ключевые слова:** загрязнение, микропластик, сетной облов, моря Арктики

Исследования микропластика в океане относятся к экосистемным, в связи с его размерной и «пищевой» привлекательностью для зоопланктона, нектона, птиц и последующим вовлечением в переносы по трофическим цепям, контаминацией водной толщи и донных осадков, пляжных грунтов, с одновременными процессами физического измельчения и биodeградации макропластика в мезо-, микро- и нанопластик, что увеличивает опасность его попадания в высшие звенья трофической пирамиды, включая человека. Активное системное изучение микропластика в России начато в 2014 г. в Дальневосточном регионе. После первых публикаций 2015 г. (об исследованиях ИО РАН в Балтийском море) к середине 2020 г. в РФ издано около 150 научных статей, посвященных исследованию микропластика. С 2017 г. объектом внимания стал Арктический регион [1].

Несмотря на значительное увеличение научных исследований в Арктическом регионе в последние годы [2–4], выводы рабочей группы Арктического совета по защите морской среды Арктики о многочисленных пробелах в знаниях о морском мусоре и микропластике в регионе Баренцева моря и Северного Ледовитого океана остаются актуаль-

ными [5]. Большинство исследований выполнено с использованием различных методик сбора и оборудования, что не позволяет сравнивать эти данные и выявить тенденции накопления микропластика.

Количественная оценка загрязнения микропластиком вод Арктических морей по единой методике отбора проб нейстонной сетью «Мантa» с ячейей 335 мкм, оснащенной цифровым счетчиком протока воды, была начата специалистами ФГБНУ «ВНИРО» в 2019 г. В ходе трансарктической экспедиции на НИС «Профессор Леванидов» собрано 39 проб микропластика на поверхности Чукотского, Восточно-Сибирского, Лаптевых и Карского морей. Аналогичные исследования были проведены в 2020 г. в ходе арктического перехода учебного парусного судна барк «Седов» по Северному морскому пути. По трассе перехода на мелководных участках шельфа Арктических морей собрано 26 проб.

Траления выполняли на скорости 2,0–3,5 узла в режиме циркуляции судна/ или движения по прямой в течение 15 минут (рис. 1).



Рис. 1. Выполнение нейстонной станции сетью «Мантa» (слева) и расположение цифрового счётчика протока воды в рамке перед её уловистой частью (справа)

Оснащение нейстонной сети счетчиком считается важным моментом для определения не только пройденного расстояния, но и для получения сравнительных количественных оценок, как прошлых исследований, так и будущих измерений микропластика. В частности, счетчик учитывает фактический объем воды, прошедший через сеть в абсолютных единицах пройденного расстояния. Важно отметить, что при определении пройденного расстояния по GPS отметкам, либо по скорости судна и времени нахождения сети в воде не всегда учитывают влияние дрейфа при тралении, попутных, или встречных, или боковых течений, а также волнения поверхностного слоя.

Всего в 2019–2020 гг. специалистами ФГБНУ «ВНИРО» на акватории Северного морского пути было выполнено 65 нейстонных станций для определения содержания в воде синтетических частиц (рис. 2).

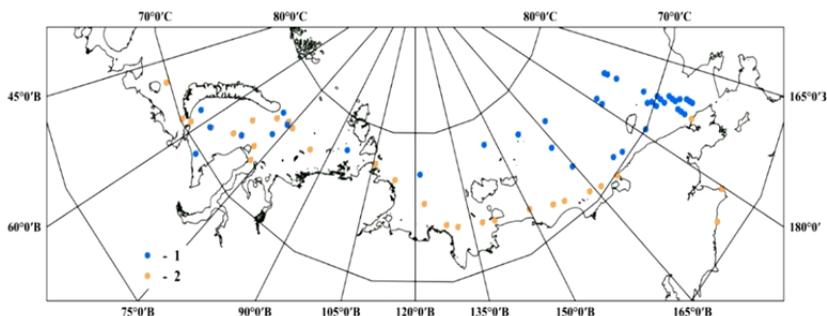


Рис. 2. Положение станций отбора проб на содержание микропластика, выполненных специалистами ФГБНУ «ВНИРО» в августе-сентябре 2019 г. (1) и августе-октябре 2020 г. (2)

Выделение частиц микропластика в собранных пробах производили в несколько этапов. В судовых условиях, при незначительном количестве планктона в пробе, проводили предварительный микроскопический анализ состава нейстона и выявление загрязняющих частиц, в т.ч. микропластика размером до 5 мм. В лабораторных условиях, выделение загрязняющих частиц проводили методом флотации с использованием насыщенного соляного раствора.

Последующая обработка проб и качественный анализ микропластика выполнялась на базе НОЦ «Нанотехнологии» Инженерной школы ФГАОУ ВО «ДВФУ» с использованием методов инфракрасной микроскопии и спектрофотометрии, с учетом практических наработок и применением накопленных баз данных. Размерный состав фиксировался с помощью ИК-микроскопа Shimadzu AIM-8800. Далее образцы анализировали методом FTIR на ИК-спектрофотометре IRTracer-100 Shimadzu с приставкой НПВО (нарушенное полное внутренне отражение) Quest горизонтального типа (Shimadzu, Япония) с диапазоном измерений от 400 до 4000 см<sup>-1</sup> и разрешением 2 см<sup>-1</sup>. Идентификация проводилась автоматическим сравнением со встроенной библиотекой спектров (STJ-Europe Spectral Database, Германия).

По размерному составу к микропластику относили всю линейку полимерных частиц в сетной пробе размером до 5 мм. При лаборатор-

ной идентификации выделенные образцы микропластика подразделялись по составу материала.

В результате лабораторной обработки проб 2019 г. синтетические частицы были обнаружены в 9 из 39 отобранных проб. При этом в Чукотском море микропластик идентифицирован в 4 из 23 проб, в Карском море – в 3 из 8 проб, в Восточно-Сибирском море в 2 из 7 проб. Количество частиц микропластика в пробах варьировало от 1 до 4 шт. Размер частиц составлял от 0,15 до 5 мм, при общей их массе в пробе от 0,00019 до 0,005 г.

Синтетические частицы были отмечены только в 23% из отобранных проб. В пробах доминировал поливинил (в Чукотском – 2 пробы, в Восточно-Сибирском – 1, в Карском море – 3 пробы). Полипропилен идентифицирован в 2 пробах в южной части Чукотского моря, полиэтилен и полистирен – в пробах из центральной части Восточно-Сибирского и юго-запада Карского морей. Исследования не выявили каких-либо закономерностей в распределении частиц полимеров и их концентрации в поверхностных водах арктических морей. Микропластик имел неравномерное распределение на исследованных акваториях морей, отсутствовали участки его накопления [6].

В августе-октябре 2020 г. отбор проб на загрязнение микропластиком выполнен на 26 станциях в Чукотском (1 ст.), Восточно-Сибирском (6 ст.), Лаптевых (6 ст.), Карском (11 ст.) и Баренцевом море (2 ст.).

Обработка и идентификация проб, отобранных в мелководной шельфовой зоне арктических морей в 2020 г., обнаружили присутствие полимерных частиц на 14 станциях (в Чукотском – 0, Восточно-Сибирском – 5, море Лаптевых – 1, Карском – 7, Баренцевом море – 1). Синтетические частицы были отмечены в 54% отобранных проб. Количество частиц микропластика в пробах варьировало от 1 до 5 шт. Размер частиц составлял от 0,5 до 5 мм, при общей их массе в пробе от 0,0001 до 0,0117 г. В пробах доминировал полиэтилен (в Восточно-Сибирском – на 3 ст., Карском – на 2 ст., Баренцевом – на 1 ст.), полипропилен (в Восточно-Сибирском – на 2 ст., Карском – на 3 ст., Баренцевом – на 1 ст.), полистирен (в море Лаптевых – на 1 ст., Карском – на 1 ст.), полиамид отмечен в 1 пробе в Карском море и HDPE – в 1 пробе в Восточно-Сибирском море. Аномально высокого содержания частиц микропластика в пробах не выявлено. Также отмечали, синтетические волокна, природные материалы: глину, песчаник, частицы металла, дерево (рис. 3). Лабораторный спектрометрический анализ проб показал, что не все частицы и волокна, визуальными идентифицированные как полимеры, являются таковыми.

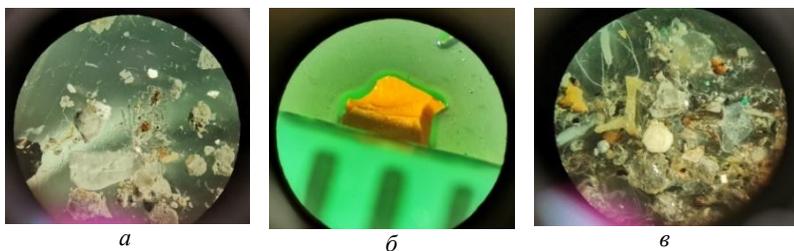


Рис. 3. Фотофиксация состава нейстонных уловов: микропластик, песчаник, глина, молодь краба (а), судовая краска (б), глина, песчаник, зоопланктон, микропластик (в). Фото А.П. Педченко 2020 г.

В ходе проведенных экспедиций отработаны методики сбора проб микропластика, адаптированные к условиям работы в полярных широтах. Оптимальным периодом для проведения мониторинга загрязнения микропластиком на большей части Арктических морей является август-сентябрь, с момента завершения цветения фитопланктона до начала осенних штормов.

Встречаемость частиц микропластика в пробах 2019–2020 гг. не превысила 38%. Количественные оценки содержания микропластика в пробах воды, полученные в экспедициях 2019 и 2020 гг. позволяют говорить о низкой степени загрязнения вод Арктических морей микропластиком. Наибольшая встречаемость полимерных частиц отмечена в Баренцевом, Карском и Чукотском морях. При этом степень загрязнения вод частицами микропластика не превысила  $0,0001 \text{ г/м}^3$  в 2019 г. и  $0,0008 \text{ г/м}^3$  в 2020 г. Важно отметить, что в ходе мониторинга не выявлены места локализации частиц полимеров на акватории этих морей. Синтетические волокна отмечали только в границах мелководного шельфа в 2020 г., наибольшая степень загрязнения отмечена в восточной части Колымского залива и составила  $0,0002 \text{ г/м}^3$ . Наблюдения, выполненные в Арктических морях, позволяют сделать предположение, что частицы полимеров активно перемещаются в водной толще под действием динамических процессов и их наибольшие концентрации отмечаются вблизи фронтальных разделов водных масс.

*Автор выражает благодарность Я.Ю. Блиновской и ее коллегам НОЦ «Нанотехнологии» Инженерной школы ФГАОУ ВО «ДВФУ» за помощь идентификации проб микропластика, руководителям Росрыболовства и ФГБНУ «ВНИРО» за содействие организации научных работ на НИС «Профессор Леванидов», УПС «Седов», а их экипажам за оказанную помощь при проведении наблюдений.*

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Педченко А.П., Блиновская Я.Ю., Кантаков Г.А., Гаврило М.В. Исследования микропластика в прибрежно-морской зоне Северного Ледовитого Океана и Северной Пацифики. // Труды IX Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2020). 2020. № 3. С. 336–340.
2. Гаврило, М.В., Мосеев, Д.С. Антропогенная нагрузка на берега Земли Франц-Иосифа // Материалы XXVII Международной береговой конференции: Арктические берега: путь к устойчивости. 2018. С. 253–256.
3. Grøsvik B.E., Prokhorova T., Eriksen E., Krivosheya P., Horneland P.A., Prozorkevich D. Assessment of marine litter in the Barents Sea, a part of the joint Norwegian-Russian ecosystem survey // *Front. Mar. Sci.* 2018.
4. Yakushev E., Gebruk A., Osadchiev A., Pakhomova S., Lusher A., Berezina A., Bert van Bavel, Vorozheikina E., Chernykh D., Kolbasova G., Razgon I., Semiletov I. Microplastics distribution in the Eurasian Arctic is affected by Atlantic waters and Siberian rivers // *Common Earth Environ.* 2021. V. 2. 23.
5. PAME. Desktop study on marine litter including microplastics in the Arctic. Proceedings of the 11th Arctic Council Ministerial Meeting, Rovaniemi, Finland. 2019. 118 p.
6. Педченко А.П., Блиновская Я.Ю. Трансарктическая экспедиция ВНИРО: Результаты исследований микропластика в Арктических морях в 2019 г. // Сборник статей Международной научно-практической конференции. 2020. С. 203–205.

## ASSESSMENT OF MICROPLASTIC CONTENT IN THE WATERS OF THE ARCTIC SEAS: MONITORING RESULTS 2019-2020

**A.P. Pedchenko**

*All-Russian Scientific Research Institute of Fisheries and Oceanography (VNIRO),  
Moscow, Russia, app3960@yandex.ru*

**Abstract.** In August-October 2019-2020, VNIRO conducted studies of microplastic pollution of the waters of the Arctic Seas. 65 samples were collected in the offshore and shallow parts of the shelf by the Manta neuston trawl equipped with a water flow meter, of which 37% were collected in the Chukchi, 29% in the Kara, 20% in the East Siberian, 11% in the Laptev and 3% in the Barents Sea. Quantitative assessments of the collected samples and identification of particles suggest a low degree of microplastic contamination of the surface waters of the seas of the Russian part of the Arctic compared to other areas of the World Ocean.

**Keywords:** pollution, microplastics, net fishing, Arctic seas

*Научное издание*

**МАТЕРИАЛЫ  
I ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ  
ПО ЗАГРЯЗНЕНИЮ  
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ МИКРОПЛАСТИКОМ  
«MicroPlasticsEnvironment-2022»  
(МРЕ-2022)**

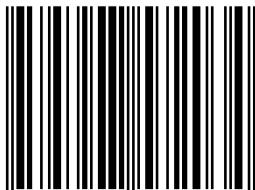
**02–06 августа 2022 г.  
п. Шира, Хакасия**

Оригинал-макет А.И. Лелююр  
Дизайн обложки Л.Д. Кривцовой

Подписано к печати 14.06.2022 г. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага для офисной техники. Гарнитура Times.  
Печ. л. 8,2. Усл. печ. л. 7,7.  
Тираж 500 экз. Заказ № .

Отпечатано на оборудовании  
Издательства Томского государственного университета  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36  
Тел. 8+(382-2)–52-98-49  
Сайт: <http://publish.tsu.ru>  
E-mail: [rio.tsu@mail.ru](mailto:rio.tsu@mail.ru)

ISBN 978-5-907572-03-4



9 785907 572034 >