

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОПАДАНИЯ МИКРОПЛАСТИКА В ОРГАНИЗМЫ ЗООПЛАНКТОНА ПРИ ПИТАНИИ

Д. А. Тихонова^{1*}, В. В. Дмитриев²

¹ Институт озераедения РАН — СПб ФИЦ РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

* e-mail: tdasha94@mail.ru

MODELLING MICROPLASTICS INTAKE BY ZOOPLANKTON DURING FEEDING

D.A. Tikhonova, V.V. Dmitriev

Предложены модели расчета вероятности попадания микропластика (МП) в организмы при питании зоопланктона. Сделаны выводы, что поступление МП в организм зоопланктона определяется не только содержанием МП в среде, но и уровнем фильтрационной активности зоопланктона, зависящим от температуры воды и суммарной пищи зоопланктеров.

Известно, что микропластик (МП) может поглощаться зоопланктоном при питании (Cole et al., 2013). В рамках моделирования процессов массообмена в водной экосистеме в качестве компонента системы был введен МП с разделением на лабильную и стойкую фракции. Предполагается, что зоопланктоном потребляется преимущественно лабильный микропластик (Тихонова, Дмитриев, 2025).

Лабильность и стойкость МП может определяться в первую очередь его химическим составом, а также размером. Важную роль при этом играет размер фильтрационной камеры зоопланктона и диапазон размеров частиц, доступных для захвата. У организмов с фильтрационным типом питания основная масса потребляемых частиц составляет 2–30 мкм, при максимальных размерах до 100–120 мкм (Крючкова, 1983). Более крупные частицы могут механически разрушаться в водной толще или при захвате и частично использоваться в питании зоопланктеров. При этом отбросы пищи могут быть твердыми (в детрит) и жидкими (в компоненты РОВ). В модели зоопланктон рассматривается как всеядный фильтратор, способный захватывать и перерабатывать фрагменты МП. В условиях отсутствия детальной информации о составе полимеров в воде в качестве лабильной фракции приняты частицы размером менее 1 мм. При этом учитывается, что концентрация МП может быть выше вследствие ограничений аналитических методов, что компенсируется введением поправочного коэффициента.

Для оценки вероятности попадания МП в рацион зоопланктона может быть использован подход, предложенный в работе (Richon et al., 2022), в которой вводится индекс экспозиции, отражающий долю МП в доступной пищевой базе с учетом трофических предпочтений. Данный показатель характеризует вероятность того, что частицы МП окажутся среди потенциально заглатываемых объектов и носит безразмерный характер. В настоящей работе данный подход был адаптирован с учетом структуры используемой модели питания зоопланктона (Сергеев и др., 2021). В качестве компонентов пищевой базы рассматриваются фитопланктон, бактерии и детрит, а также лабильный МП. Вклад каждого компонента в рацион определяется коэффициентами взаимодействия зоопланктона с компонентами пищи и долей фактически потребляемой пищи. На этой основе рассчитывается индекс экспозиции МП ($Exposure_{Plab}$), характеризующий относительную долю микропластика в составе доступной пищи:

$$Exposure_{Plab} = \frac{P_{lab}}{\sum_{i \in R} (X_i \cdot o_i)} \cdot Grazing_{norm},$$

где R — множество компонентов пищи (фитопланктон, бактерии, детрит, мг сух. в.·л⁻¹), P_{lab} — содержание лабильного МП, мг сух. в.·л⁻¹, X_i — концентрация или биомасса компонента пищи i (фитопланктона, бактерий, лабильного и стойкого детрита), мг сух. в.·л⁻¹, o_i — отношение рациона к экологическому рациону (рацион + отбросы), G_{norm} — нормированная суммарная скорость выедания всех компонентов пищи зоопланктоном (G_z) (Сергеев и др., 2021).

В отличие от подхода, учитывающего только состав пищевой базы, в работе дополнительно введена оценка интенсивности фактического поступления МП в организм зоопланктона ($Intake_{Plab}$). Этот показатель определяется как произведение индекса экспозиции ($Exposure_{Plab}$) на фильтрационную активность (FA) зоопланктона (Сергеев и др., 2021), что позволяет учитывать не только вероятность попадания МП в пищу, но и интенсивность фильтрации воды.

Сценарные расчеты показали, что при увеличении концентрации МП в воде значения $Exposure_{Plab}$ и $Intake_{Plab}$ возрастают (табл.), однако характер этого роста существенно различается в зависимости от температурных условий. В «теплом» сценарии наблюдается значительно более высокий уровень поступления МП, тогда как в «холодном» сценарии его значения остаются на несколько порядков ниже, вследствие снижения фильтрационной активности зоопланктона. При натурных концентрациях МП (порядка 10^{-5} – 10^{-4} мг·л⁻¹) значения $Intake_{Plab}$ крайне малы, тогда как при увеличении содержания МП до 0,2–2 мг·л⁻¹ происходит их резкий рост.

Таким образом, полученные результаты показывают, что поступление МП в организм зоопланктона определяется не только его концентрацией в среде, но и уровнем фильтрационной активности, зависящим от температурных условий и суммарной пищи зоопланктона. Предложенный подход позволяет связать вероятность попадания МП в рацион с реальными потоками вещества через организм и может быть использован для анализа трофических последствий загрязнения водных экосистем МП.

Изменения $Exposure_{Plab}$ и $Intake_{Plab}$ в зависимости от содержания МП

МП, мг·л ⁻¹	$Exposure_{Plab}$	$Intake_{Plab}$, сут ⁻¹
0	0	0
0,00002	0,00002/7,4 × 10 ⁻⁹	5 × 10 ⁻⁶ /1,7 × 10 ⁻¹¹
0,02	0,02/0,00001	0,005/2,6 × 10 ⁻⁸
0,2	0,2/0,0005	0,05/1,1 × 10 ⁻⁶
2	2/0,04	0,5/0,0001

Примечание. Через дробь указаны значения для «теплого» (20 °C) / «холодного» (3 °C) сценария.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИНОЗ РАН — СПб ФИЦ РАН (тема FFZF-2024-0002 «Современные угрозы водным объектам и инновационные методы их сохранения, восстановления и рационального использования»).

Литература

- Крючкова Н. М. Роль фильтраторов зоопланктона в трофодинамике пресных вод: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Л., 1984. 38 с.
- Сергеев Ю. Н., Кулеш В. П., Дмитриев В. В. Пространственно-неоднородная модель экосистемы эстуария р. Невы. Имитации последствий строительства Санкт-Петербургской дамбы. СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2021. 310 с.
- Тихонова Д. А., Дмитриев В. В. Моделирование влияния микропластика на обменные процессы и естественное отмирание зоопланктона в водоеме // Гидрометеорология и экология. 2025. № 80. С. 547–561.
- Cole M., Lindeque P., Fileman E. et al. Microplastic ingestion by zooplankton // Environmental Science & Technology. 2013. Vol. 47 (12). P. 6646–6655.
- Richon C., Gorgues T., Cole M. et al. Model exploration of microplastic effects on zooplankton grazing reveal potential impacts on the global carbon cycle // Environmental Research Letters. 2024. Vol. 19 (7): 074031.