

Влияние частиц микропластика полистирола на морфологические и функциональные показатели *Daphnia magna*

© 2022. О. В. Никитин¹, к. г. н., зав. кафедрой, Э. И. Насырова¹, ассистент, Р. С. Кузьмин², директор, Л. М. Миннегулова¹, студент,

В. З. Латыпова^{1,3}, д. х. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией, Т. Я. Ашихмина^{4,5}, д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18,

²ООО «Экоаудит»,

420061, Россия, г. Казань, ул. Сеченова, д. 17,

³Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, д. 28,

⁴Вятский государственный университет,

610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

⁵Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук,

167000, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

e-mail: olnova@mail.ru

В статье на основе результатов лабораторного моделирования оценено биологическое воздействие микропластиков на пресноводные организмы на примере влияния микрочастиц полистирола на морфофункциональные показатели (выживаемость, размерные характеристики, двигательную активность) пресноводных ракообразных *Daphnia magna* Straus. Исследуемые частицы микропластика полистирола имели в опытах однородный фракционный состав: < 10 мкм ($\approx 5\%$), < 50 мкм ($\approx 40\%$) и < 100 мкм ($\approx 75\%$). Полулетальная концентрация LC_{50} для микрочастиц полистирола, определённая в остром токсикологическом эксперименте, составила 197,35 мг/л (95% доверительный интервал: 163,10–259,98 мг/л). При 48 ч экспозиции во всём интервале исследованных концентраций микропластика (0 (контроль), 10, 50, 125 и 200 мг/л) влияние на морфометрические параметры *D. magna* обнаружено не было, средний размер особей составлял $1,75 \pm 0,01$ мм. После 24 ч экспозиции скорость плавания *D. magna* была максимальной в контрольных условиях (в среднем $0,87 \pm 0,10$ см/с). Внесение в среду микрочастиц полистирола в концентрациях 50, 125 и 200 мг/л статистически значимо снизило (приблизительно на 44%) скорость плавания. Трофическая активность *D. magna*, оценённая по флуоресценции хлорофилла зелёной водоросли *Chlorella vulgaris* Beijerinck и составляющая 96% в контрольных условиях, понижалась при внесении микропластика в среду и при максимальной концентрации микропластика (200 мг/л) достигала значения 19%. Методом микроскопирования показано, что клетки хлореллы, заполняющие кишечник дафний в контрольных условиях, замещаются преимущественно частицами полистирола при добавлении в суспензию водоросли частиц микропластика в концентрации 200 мг/л. Полученные результаты свидетельствуют о воздействии частиц микропластика полистирола на пресноводные организмы.

Ключевые слова: микропластик, полистирол, *Daphnia magna*, *Chlorella vulgaris*, токсичность, скорость плавания, трофическая активность, морфометрические параметры.

Effects of polystyrene microplastic particles on the morphological and functional parameters of *Daphnia magna*

© 2022. O. V. Nikitin¹ ORCID: 0000-0002-6753-0597, E. I. Nasyrova¹ ORCID: 0000-0001-6648-9185,

R. S. Kuzmin² ORCID: 0000-0001-8066-1148, L. M. Minnegulova¹ ORCID: 0000-0001-5992-5532,

V. Z. Latypova^{1,3} ORCID: 0000-0002-8490-6939, T. Ya. Ashikhmina^{4,5} ORCID: 0000-0003-4919-0047,

¹Kazan (Volga Region) Federal University, 18, Kremlyovskaya St., Kazan, Russia, 420008,

²Ekoaudit LLC,

17, Sechenova St., Kazan, Russia, 420061,

³Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use
of Tatarstan Academy of Sciences,
28, Daurskaya St., Kazan, Russia, 420087,

⁴Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

⁵Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167000,
e-mail: olnova@mail.ru

Based on the results of laboratory modeling, the article evaluates the biological impact of microplastics on freshwater organisms using the example of the effect of polystyrene microparticles on the morphological and functional parameters (survival rate, size characteristics, locomotor and trophic activity) of freshwater crustaceans *Daphnia magna* Straus. The studied particles of polystyrene microplastics had homogeneous fractional composition in the experiments: < 10 µm (≈ 5%), < 50 µm (≈ 40%) and < 100 µm (≈ 75%). The median lethal concentration LC₅₀ for polystyrene microparticles, determined in an acute toxicological experiment, was 197.35 mg/L (95% confidence interval: 163.10–259.98 mg/L). At 48 h of exposure in the entire range of the studied concentrations of microplastics (0 (control), 10, 50, 125 and 200 mg/L), no effect on the morphometric parameters of *D. magna* was found, the average size of individuals was 1.75±0.01 mm. After 24 h of exposure, the swimming speed of *D. magna* was maximal under control conditions (mean 0.87±0.10 cm/s). The addition of polystyrene microparticles into the medium at concentrations of 50, 125, and 200 mg/L significantly reduced (by about 44%) the swimming speed. The trophic activity of *D. magna*, estimated by the chlorophyll fluorescence of the alga *Chlorella vulgaris* Beijerinck and amounting to 96% under control conditions, decreased when microplastics were added to the medium, reaching 19% at the maximum concentration of microplastics (200 mg/L). It has been shown by microscopy that *Chlorella* cells that fill the gut of *Daphnia* under control conditions are replaced mainly by polystyrene particles when microplastics are added to the algae suspension at a concentration of 200 mg/L. The results obtained indicate the impact of polystyrene microplastic particles on freshwater organisms.

Keywords: microplastics, polystyrene, *Daphnia magna*, *Chlorella vulgaris*, toxicity, swimming speed, trophic activity, morphometric parameters.

Одной из составляющих актуальной проблемы загрязнения компонентов окружающей среды пластмассовыми отходами является загрязнение поверхностных вод частицами микроскопического размера – частицами микропластика [1–2]. Исследования последних лет показали, что частицы микропластика широко распространены не только в наиболее изученных морских экосистемах [3], но и в поверхностных водах и донных отложениях различных пресноводных экосистем [4–7].

Частицы микропластика могут оказывать комплексное негативное воздействие на водные экосистемы, включая механизмы физического и химического действия [8]. Ряд исследований подтверждают биологическое воздействие микропластиков на пресноводные организмы – водоросли [9], зоопланктон [10, 11], бентос [12] и рыб [13–15].

Ограниченность и противоречивость сведений о биологическом воздействии микропластиков на пресноводные организмы [10, 16], необходимых для выяснения механизмов токсичности микропластиков, делает исследование в этой области весьма актуальными.

Целью работы было оценить влияние частиц микропластика полистирола на морфо-

функциональные показатели пресноводных кладоцер *Daphnia magna* Straus в условиях лабораторного моделирования.

Объекты и методы исследования

В качестве материала для исследования был выбран полистирол – один из наиболее часто используемых пластиковых полимеров во всём мире [4] и доминирующих при проведении экотоксикологических экспериментов [11]. Использовали пищевой полистирол, измельчённый до микроскопических размеров при помощи лабораторной ступки и пропущенный через металлическое сито с диаметром ячеек 100 мкм. Размерные характеристики полученных частиц микропластика были установлены и контролировались при помощи лазерного дифракционного анализатора размера частиц Hydro 2000S (Malvern Instruments). Химический анализ, подтверждающий отнесение частиц к полистиролу, выполнен на ИК-Фурье спектрометре FT-801 (СИМЕКС).

Daphnia magna – один из ключевых элементов пресноводных сообществ гидробионтов и наиболее востребованных модельных организмов в экотоксикологических исследованиях [17], способный в естественных

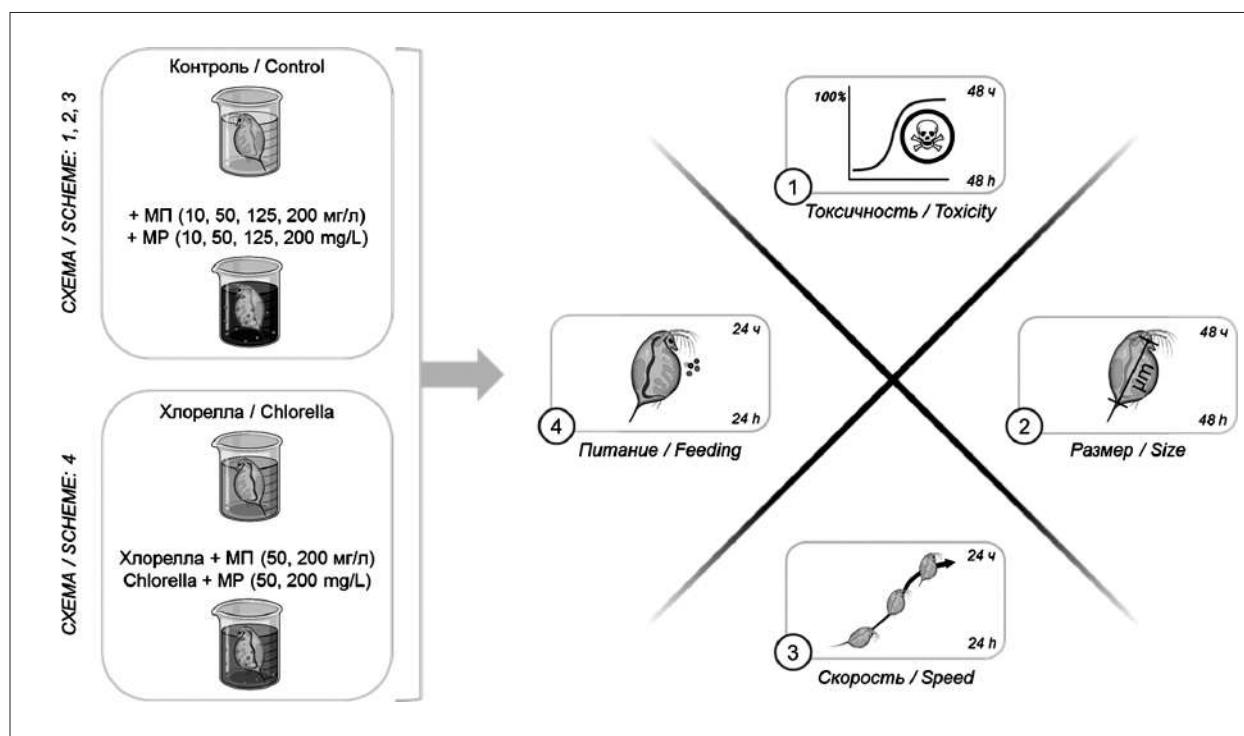


Рис. 1. Общая схема исследований оценки влияния частиц микропластика полистирола (МП) на морфофункциональные показатели дафний в лабораторных условиях
 Fig. 1. The general scheme of studies to evaluate the effect of polystyrene microplastics (MP) on the morphofunctional parameters of daphnia in laboratory conditions

условиях поглощать частицы микропластика в толще воды вместе со своим основным питанием (фитопланктоном). Для лабораторных экспериментов использовали лабораторную культуру *D. magna*, выращиваемую в соответствии с ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.12-06 (изд. 2014 г.) в климатостате В4 (Энерголаб).

Эксперименты проводили в условиях лабораторного моделирования по общей схеме, представленной на рисунке 1.

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

Оценку токсичности частиц микропластика полистирола проводили в остром опыте (48 ч) по смертности *D. magna* в соответствии с ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.12-06. Для оценки LC_{50} использовали пробит-анализ зависимости доза-эффект при помощи программы MedCalc 20 (MedCalc Software).

Оценку влияния частиц микропластика полистирола на двигательную активность *D. magna* осуществляли через 24 ч по изменению скорости плавания организмов при помощи анализатора токсичности TaskTox, реализующего алгоритмы компьютерного зрения [18, 19].

Для оценки трофической активности *D. magna* использовали культуру зелёной водо-

росли *Chlorella vulgaris* Beijerinck. Культуру водоросли выращивали в культиваторе КВ-05 (Энерголаб) на 10% среде Тамия. Трофическую активность дафний определяли по степени снижения концентрации корма в среде с рачками при 24 ч экспозиции. Начальное количество хлореллы соответствовало оптической плотности 0,025D, определённой при помощи измерителя плотности суспензии ИПС-03 (Энерголаб). Количество съеденного корма (суспензии водоросли хлорелла) измеряли по интенсивности уровня флуоресценции хлорофилла водоросли, которую регистрировали на флуориметре Фотон-10 (Энерголаб).

Показатели трофической активности рассчитывали по формуле [20]:

$$TA = \frac{F_{\text{хл}} - F_{\text{хл+р}}}{F_{\text{хл}}} \cdot 100\%,$$

где TA – трофическая активность (%); $F_{\text{хл}}$ – показатель флуоресценции в суспензии хлореллы (отн. ед.); $F_{\text{хл+р}}$ – показатель флуоресценции в суспензии хлореллы с рачками (отн. ед.).

Эксперименты проводили в 6-кратной повторности, статистическую обработку полученных данных проводили с использованием программного обеспечения Statistica 12 (StatSoft). Рассчитаны показатели среднее \pm

ошибка среднего ($M \pm m$), проведена оценка статистической значимости различий при помощи однофакторного дисперсионного анализа.

Результаты и обсуждение

Выживаемость *D. magna*. Была выполнена серия экспериментов с частицами микропластика полистирола, преимущественно (около 75%) имеющими размеры менее 100 мкм (рис. 2) и доступными для поглощения дафниями.

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 полумлетальную концентрацию LC_{50} для микрочастиц полистирола, составившую 197,35 мг/л, с границами 95% доверительного интервала 163,10–259,98 мг/л (рис. 3).

Полученные значения LC_{50} согласуются с порядком соответствующих величин для полимерных микрочастиц, известных из литературы [10, 21, 22].

В литературе приводятся сведения об увеличении токсичности микропластика с уменьшением размера их частиц [21] и о возрастании негативных эффектов с **ростом** продолжительности воздействия – в хронических экспериментах при более низких концентра-

циях микропластика по сравнению с острыми экспериментами [22].

Размерные характеристики *D. magna*. 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. Подобное отмечают и другие исследователи. Например, в работе [12] отмечается, что длина тела *D. magna* значимо уменьшилась лишь при хроническом воздействии высоких концентраций частиц микропластика (21 сут; 160 и 320 мг/л). Аналогичные выводы приводятся и в работе [22].

Двигательная активность *D. magna*. Эксперименты по оценке влияния частиц полистирола на двигательную активность дафний (рис. 4) 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 (приблизительно 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

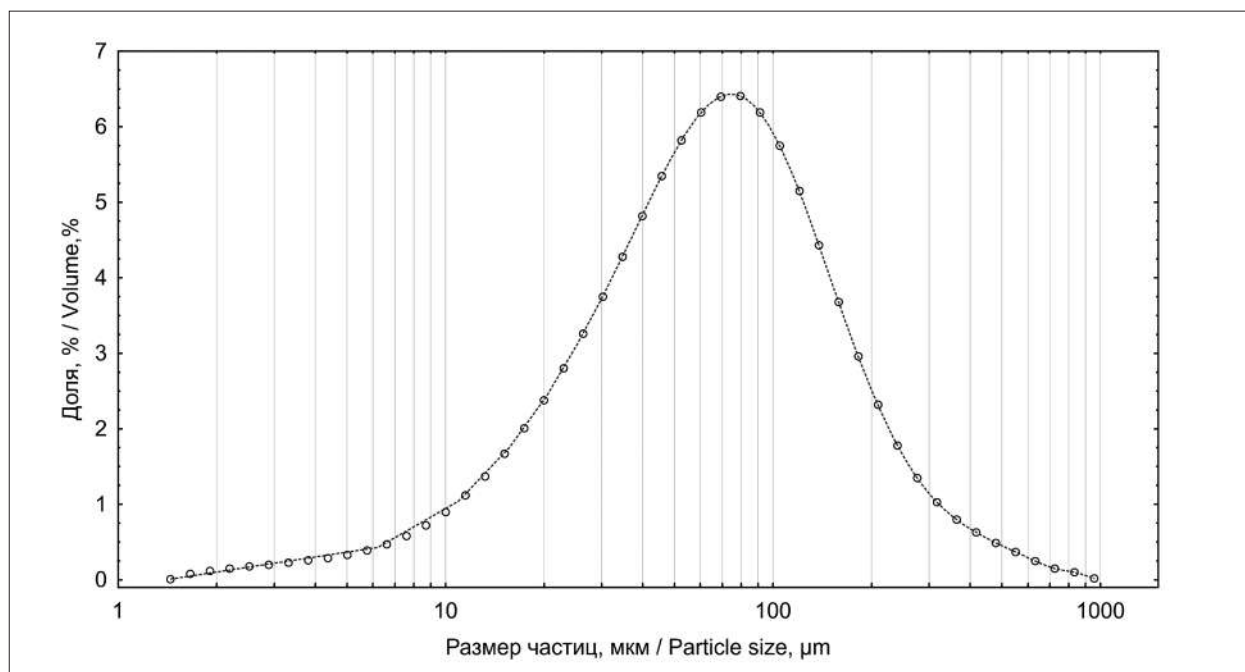


Рис. 2. Размерные фракции частиц микропластика полистирола
 Fig. 2. Size fractions of polystyrene microplastics

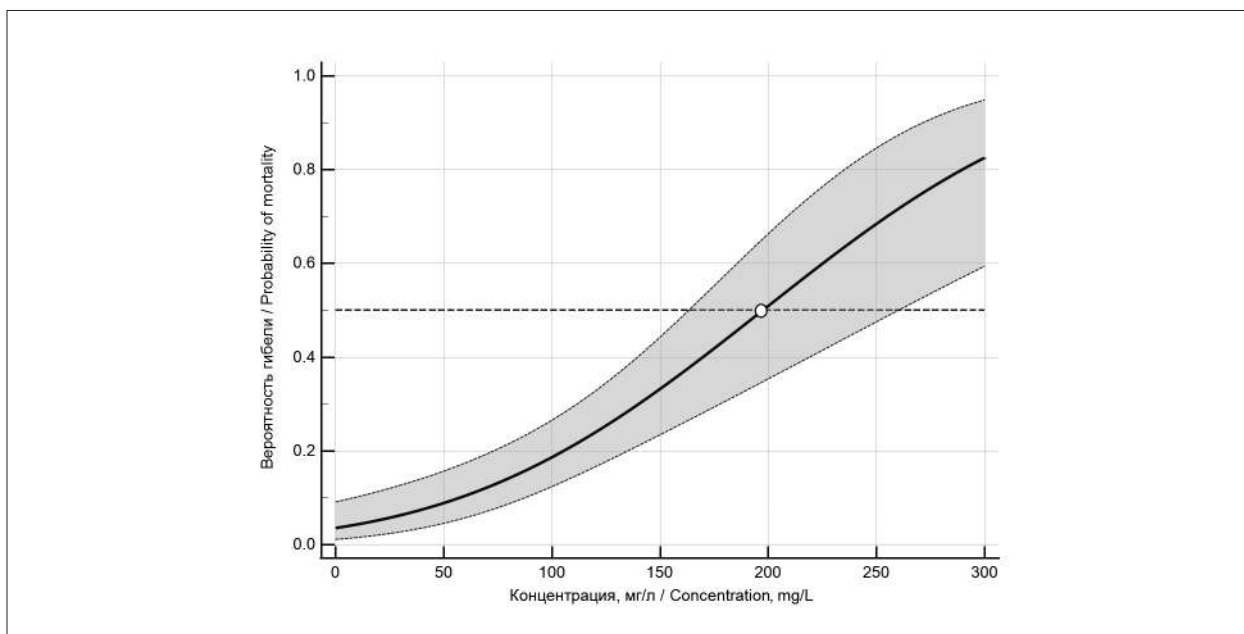


Рис. 3. Зависимость доза-эффект для микропластиц полистирола в экспериментах с дафниями
Fig. 3. Dose-response relationship for polystyrene microplastics in experiments with daphnia

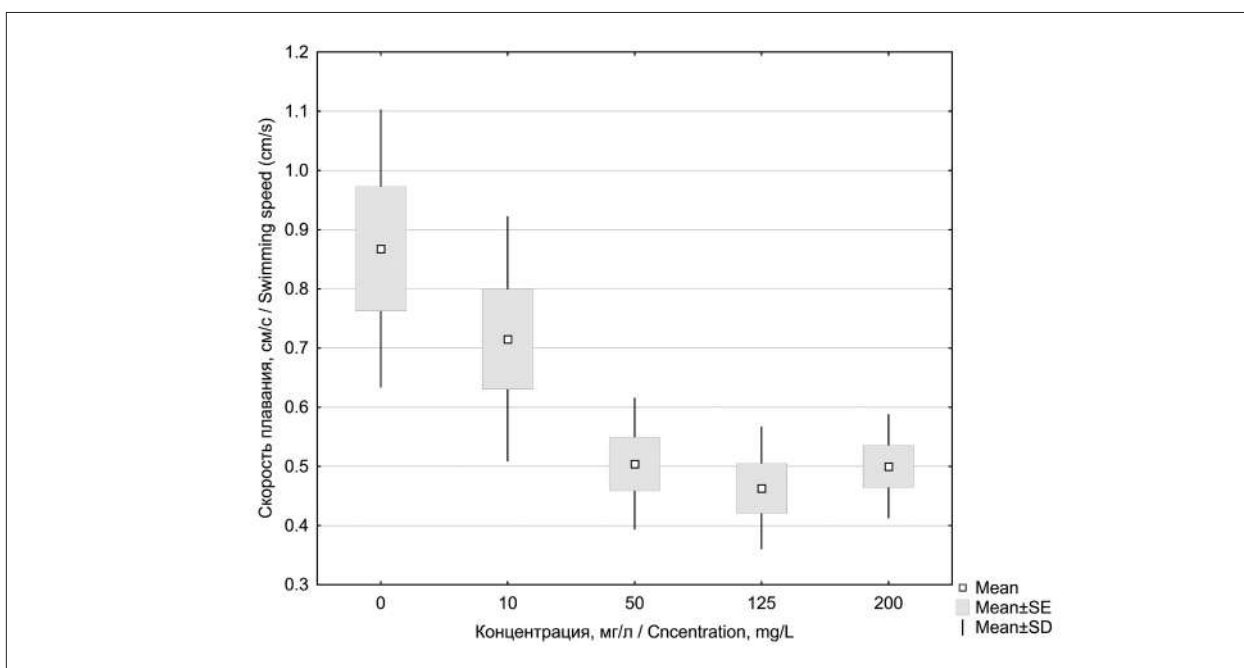


Рис. 4. Скорость плавания дафний в экспериментах с различной концентрацией микропластиц полистирола при 24 ч экспозиции
Fig. 4. Daphnia swimming speed in experiments with different concentrations of polystyrene microplastics at 24 hours of exposure

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 приво-

дить к большему сопротивлению воды при их движении.

Литературные сведения по влиянию частиц микропластика на скорость плавания дафний эпизодичны и противоречивы. Так, отмечаемое в исследовании [23] отсутствие значимого влияния высоких концентраций частиц микропластика полистирола на плава-

О. В. Никитин, Э. И. Насырова, Р. С. Кузьмин, Л. М. Миннегулова,
В. З. Латыпова, Т. Я. Ашихмина
«Влияние частиц микропластика полистирола
на морфологические и функциональные показатели
Daphnia magna». С. 196



Рис. 5. Внешний вид дафний в эксперименте по определению трофической активности: без добавления (слева) и с добавлением частиц микропластика полистирола в концентрации 200 мг/л (справа)

Fig. 5. Appearance of daphnia in an experiment to determine trophic activity: without (left) and with the polystyrene microplastics at a concentration of 200 mg/L (right)

тельную активность дафний (скорость дафний составляла $0,92 \pm 0,40$ см/с), может быть обусловлено значительными размерами используемых частиц ($0,95 \pm 0,025$ мм). В работе [24] обнаруженное значимое снижение скорости движения дафний в присутствии высоких концентраций микропластика предлагается использовать в качестве сублетального индикатора токсичности.

Трофическая активность *D. magna*. 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 по показателю флуоресценции хлорофилла зелёной водоросли хлорелла, использованной в качестве пищевого субстрата. Результаты представлены в таблице.

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%; 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. Методом микроскопирования выявлено различие в содержимом пищеварительной системы дафний в контрольных условиях (клетки зелёной водоросли хлорелла) и при добавлении в суспензию водоросли частиц микропластика,

особенно в концентрации 200 мг/л (частицы белого цвета) (рис. 5, см. цв. вкладку IV). Следовательно, микропластик полистирола при высоких концентрациях в среде может приводить к замедлению водорослевых клеток преимущественно частицами полистирола в пищеварительной системе дафний. В других органах дафний частицы микропластика визуалью не были заметны, что отмечается авторами исследования [25].

Заключение

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 [26], однако могут позволить лучше понять возможные механизмы воздействия.

Учитывая важность оценки рисков широкого распространения частиц микропластика в пресноводных экосистемах для гидробионтов и здоровья человека, целесообразно включать в программу мониторинга поверхностных вод показатели содержания разных фракций пластика, а также продолжить экотоксикологические исследования по изучению механизмов

Таблица / Table

Данные эксперимента по оценке трофической активности (ТА) дафний в условиях отсутствия и наличия микропластика полистирола по показателю флуоресценции хлорофилла (*F*, отн. ед.)
Experimental data on the assessment of trophic activity (TA) of daphnia in the absence and presence of polystyrene microplastics by chlorophyll fluorescence (*F*, rel. units)

Вариант Variant	$F_{\text{сред.}} / F_{\text{mean}}$	$F_{\text{мин.}} / F_{\text{min.}}$	$F_{\text{макс.}} / F_{\text{max.}}$	Ст. откл. Std. err.	Ст. ош. Std. dev.	ТА, %
1. Хлорелла / Chlorella	400,0	357	440	35,4	17,7	–
2. Хлорелла+Дафнии Chlorella+Daphnia	14,3	1	23	10,0	5,0	96
3. Хлорелла+Дафнии+МП50 Chlorella+Daphnia+MP50	57,3	49	70	9,8	4,9	86
4. Хлорелла+Дафнии+МП200 Chlorella+Daphnia+MP200	324,5	277	434	73,4	36,7	19

Примечание. Варианты: 1 – среда с пищевым субстратом (суспензия водоросли хлорелла); 2–4 – внесение дафний в суспензию в отсутствие и в присутствии микропластика (МП) в концентрациях 50 и 200 мг/л в среде соответственно.

Note. Variants: 1 – medium with food substrate (suspension of chlorella algae); variants 2–4 – introduction of daphnia into suspension in the absence and in the presence of microplastics (MP) at concentrations of 50 and 200 mg/L in the medium respectively.

негативного воздействия частиц микропластика на гидробионты.

Работа выполнена за счёт средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2022-0003.

Авторы выражают благодарность сотрудникам кафедры физической химии к. х. н., старшему преподавателю Д.А. Корнилову и инженеру А.Ю. Киргизову (Химический институт КФУ) за помощь в определении фракционного состава микропластика.

References

1. Bohdan K. Estimating global marine surface microplastic abundance: systematic literature review // *Science of the Total Environment*. 2022. V. 832. Article No. 155064. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155064
2. Pakhomova S., Berezina A., Lusher A.L., Zhdanov I., Silvestrova K., Zvialev P., van Bavel B., Yakushev E. Microplastic variability in subsurface water from the Arctic to Antarctica // *Environmental Pollution*. 2022. V. 298. Article No. 118808. doi: 10.1016/j.envpol.2022.118808
3. Nikitin O.V., Latypova V.Z., Ashikhmina T.Ya., Kuzmin R.S., Nasyrova E.I., Haripov I.I. Microscopic particles of synthetic polymers in freshwater ecosystems: review and the current state of the problem // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 4. P. 216–222 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-216-222
4. 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. doi: 10.1016/j.watres.2019.02.054
5. 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. No. 1. Article No. 80. doi: 10.3390/su13010080
6. Lisina A.A., Platonov M.M., Lomakov O.I., Sazonov A.A., Shishova T.V., Berkovich A.K., Frolova N.L. Microplastic abundance in Volga River: results of a pilot study in summer 2020 // *Geography, Environment, Sustainability*. 2021. V. 14. No. 3. P. 82–93. doi: 10.24057/2071-9388-2021-041
7. Wang Y., Zhou B., Chen H., Yuan R., Wang F. Distribution, biological effects and biofilms of microplastics in freshwater systems – a review // *Chemosphere*. 2022. V. 299. Article No. 134370. doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.134370
8. 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. doi: 10.1016/bs.coac.2016.10.004

9. Lazareva A.M., Ipatova V.I., Il'ina O.V., Todorenko D.A., Matorin D.N., Baizhumanov A.A. Toxic effects of microplastics on culture *Scenedesmus quadricauda*: interactions between microplastics and algae // *Moscow Univ. Biol. Sci. Bull.* 2021. V. 76. P. 202–209. doi: 10.3103/S0096392521040076
10. 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. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.09.176
11. 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. Article No. 128136. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.128136
12. Castro G.B., Bernegossi A.C., Pinheiro F.R., Corbi J.J. The silent harm of polyethylene microplastics: invertebrates growth inhibition as a warning of the microplastic pollution in continental waters // *Limnologica*. 2022. V. 93. Article No. 125964. doi: 10.1016/j.limno.2022.125964
13. Kaloyianni M., Bobori D.C., Xanthopoulou D., Malioufa G., Sampsonidis I., Kalogiannis S., Feidantsis K., Kastrinaki G., Dimitriadi A., Koumoundouros G., Lambropoulou D.A., Kyzas G.Z., Bikiaris D.N. Toxicity and functional tissue responses of two freshwater fish after exposure to polystyrene microplastics // *Toxics*. 2021. V. 9. No. 11. Article No. 289. doi: 10.3390/toxics9110289
14. Marana M.H., Poulsen R., Thormar E.A., Clausen C.G., Thit A., Mathiessen H., Jaafar R., Korbut R., Hansen A.M.B., Hansen M., Limborg M.T., Syberg K., von Gersdorff Jørgensen L. Plastic nanoparticles cause mild inflammation, disrupt metabolic pathways, change the gut microbiota and affect reproduction in zebrafish: A full generation multi-omics study // *Journal of Hazardous Materials*. 2022. V. 424. Article No. 127705. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.127705
15. Castro-Castellon A.T., Horton A.A., Hughes J.M.R., Rampley C., Jeffers E.S., Bussi G., Whitehead P. Ecotoxicity of microplastics to freshwater biota: considering exposure and hazard across trophic levels // *Science of the Total Environment*. 2022. V. 816. Article No. 151638. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151638
16. Chae Y., An Y.-J. Effects of micro- and nanoplastics on aquatic ecosystems: current research trends and perspectives // *Marine Pollution Bulletin*. 2017. V. 124. No. 2. P. 624–632. doi: 10.1016/j.marpolbul.2017.01.070
17. Olkova A. Control of suitability of the culture *Daphnia magna* Straus for bioassays of aquatic environments, taking into account demographic indicators of model populations // *Water (Switzerland)*. 2021. V. 13. No. 1. Article No. 47. doi: 10.3390/w13010047
18. Nikitin O., Latypova V. Behavioral response of *Daphnia magna* (Crustacea, Cladocera) to low concentration of microcystin // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. 2014. V. 2. No. 5. P. 85–92.

19. Nikitin O.V., Petrova V.M., Latypova V.Z. Bioassay of pyrethroid insecticide esfenvalerate using fractal analysis of *Daphnia magna* motion // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2018. V. 6. No. 6. P. 1729–1736.
20. 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. No. 6. P. 662–666. doi: 10.1134/S1995425513060103
21. Frydkjær C.K., Iversen N., Roslev P. Ingestion and egestion of microplastics by the cladoceran *Daphnia magna*: effects of regular and irregular shaped plastic and sorbed phenanthrene // Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 2017. V. 99. P. 655–661. doi: 10.1007/s00128-017-2186-3
22. Eltemsah Y.S., Bøhn T. Acute and chronic effects of polystyrene microplastics on juvenile and adult *Daphnia magna* // Environmental Pollution. 2019. V. 254. Article No. 112919. doi: 10.1016/j.envpol.2019.07.087
23. Fabricant L., Edelstein O., Dispigno J., Weseley A. The effect of microplastics on the speed, mortality rate, and swimming patterns of *Daphnia magna* // Journal of Emerging Investigators. 2021. V. 4. P. 1–5.
24. Magester S., Barcelona A., Colomer J., Serra T. Vertical distribution of microplastics in water bodies causes sublethal effects and changes in *Daphnia magna* swimming behaviour // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2021. V. 228. Article No. 113001. doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.113001
25. Elizalde-Velázquez A., Carcano A.M., Crago J., Green M.J., Shah S.A., Cañas-Carrell J.E. Translocation, trophic transfer, accumulation and depuration of polystyrene microplastics in *Daphnia magna* and *Pimephales promelas* // Environmental Pollution. 2020. V. 259. Article No. 113937. doi: 10.1016/j.envpol.2020.113937
26. Aljaibachi R., Laird W.B., Stevens F., Callaghan A. Impacts of polystyrene microplastics on *Daphnia magna*: a laboratory and a mesocosm study // Science of the Total Environment. 2020. V. 705. Article No. 135800. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135800