

УДК 574.64

## **КОМБИНИРОВАННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ЧАСТИЦ ПОЛИСТИРОЛА И ИОНОВ МЕДИ НА ЖИЗНЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ *DAPHNIA MAGNA* В РЯДУ ПОКОЛЕНИЙ**

**А. Н. Рак<sup>\*</sup>, Д. М. Гершкович, О. В. Ильина, А. А. Поярков**

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

*119234 Москва, Ленинские горы, д. 1, e-mail: \*rakan@my.msu.ru*

Поступила в редакцию 14.05.2025

Исследовано влияние комбинации микрочастиц полистирола различного происхождения и ионов меди на развитие тест-объектов культуры ветвистоусых ракообразных *Daphnia magna* в хронических экспериментах на протяжении четырех поколений. В статье рассматривается два варианта воздействия частиц микропластика (МП) на культуру — кратковременное (воздействие в течение первых 7 сут.) и постоянное (на протяжении четырех поколений). Влияние кратковременного воздействия рассматривалось для образца полистирола, отобранного на супралиторали Баренцева моря, а также для нового образца. Эффект постоянного воздействия оценивался только для образца, изъятого из окружающей среды. Во всех случаях содержание ионов меди в растворе оставалось постоянным (0.05 мг/л) на протяжении всех поколений. При кратковременном воздействии частиц МП (50 мг/л) отмечен протекторный эффект в присутствии ионов меди, выражающийся в увеличении продолжительности жизни особей в сравнении с группами, не подвергшимися воздействию МП. При постоянном воздействии частиц МП (25 мг/л) данный эффект выражен слабее.

*Ключевые слова:* микропластик, полистирол, биотестирование, *Daphnia magna*.

DOI: 10.47021/0320-3557-2026-80-87

### **ВВЕДЕНИЕ**

Под термином “пластик” понимают семейство синтетических органических полимеров, активное производство которых началось с 1940-х годов. Создание пластика осуществляется методами полимеризации и поликонденсации в результате реакции многократного соединения мономерных структурных единиц в одну большую макромолекулу. Все виды синтетических материалов в большей или меньшей степени подвержены деградации. Под деградацией пластика понимают частичное или полное разрушение полимера в результате нарушения его структуры, что приводит к снижению молекулярной массы и механической интеграции. Однако, если стабильность, инертность и долговечность пластиков являются основными потребительскими свойствами пластиков, очевидно, что процессы разрушения их в естественной среде крайне медленные. Вопрос о времени минерализации — преобразовании в простые неорганические соединения — авторы мировой литературы считают риторическим [Казмирук, 2020 (Kazmiruk, 2020)].

В водной среде главную роль в разрушении изделий будет играть механическое истирание (абразия) и биodeградация. Биodeградация осуществляется микроорганизмами (бактериями и грибами) до полного или частичного разрушения органического вещества. При этом на поверхности изделий или их фрагментов образуются биопленки, которые уменьшают воздействие УФ-излучения, увеличивают удельный

вес частиц и приводят к их погружению [UNEP, 2011].

Пластиковый мусор бесконтрольно накапливается в окружающей среде, распадается на микропластик (МП) и представляет угрозу для биоразнообразия.

МП можно разделить на первичный, который имеет физико-химические свойства, заданные производителем, и вторичный — со случайными характеристиками, которые он приобретает в окружающей среде. Первичный МП выпускается в качестве полуфабриката для использования в получении продукции полимерной промышленности, в этом случае он может иметь форму гранул, хлопьев, порошков, суспензий или эмульсий. Такие МП могут попадать в природу в ходе транспортировки или производства. Сферические МП применяются непосредственно как добавка в различные средства гигиены, также сферы МП используются как абразивные материалы для струйной очистки фасадов зданий или корпусов кораблей.

Такие физические характеристики как размер, форма и вес МП влияют на его перемещение в пространстве и на взаимодействие с другими веществами. При анализе сорбционных и токсических свойств МП важными параметрами будут являться кристалличность полимера, его плотность, наличие и диаметр пор, площадь поверхности и удельная площадь поверхности частиц.

Плотность частиц определяется материалом их происхождения. При равном размере частицы могут обладать разной плотностью, что отразится на их перемещении (ветром на суше) и распределении в водных системах. Частицы с разной плотностью, находящиеся в водной среде, могут оседать на дно или долгое время находится в толще воды. Нахождение в подповерхностном слое воды способствует дальнейшей фрагментации за счет воздействия УФ-излучения и механического воздействия находящихся в воде объектов, береговой линии и т.д. Повышению плотности и оседанию на дно может способствовать агрегация с органическими и неорганическими частицами, что приводит к захоронению МП в донных отложениях.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения исследования в качестве тест объекта были выбраны *Daphnia magna* Straus (класс Crustacea, отряд Cladocera). Рачки данного вида распространены на территории России повсеместно и обитают в стоячих и слабопроточных водоемах, временных лужах. Источником питания дафний в природных водоемах являются бактерии, одноклеточные водоросли, детрит, растворенные органические вещества, которые дафния поглощает с помощью активной фильтрации. Интенсивность потребления корма зависит от его характера, концентрации в среде, температуры, возраста рачков и т. д. Скопление пищи в желобе свидетельствует о неблагополучии в питании дафний, как и в случае, когда “сито” забито взвесью. Чрезмерно высокое содержание кормовых частиц снижает активность питания дафний, и они могут погибнуть вследствие засорения пищевого аппарата [Терехова и др., 2014 (Terekhova et al., 2014)].

В работе применяли полимерный материал полистирол (PS) двух типов. Первичный полистирол, он же интактный, не подвергшийся воздействию факторов окружающей среды, получен из упаковочного материала лабораторного оборудования. Вторичный полистирол, он же контактный, отобраный на литорали после неопределенного по времени воздействия факторов окружающей среды. Макрообразцы пластика для получения МП и проведения исследования были собраны в ходе летней экспедиции 2022 г. И предоставлены сотрудником кафедры общей экологии и гидробиологии биологического факультета МГУ

Стоит отметить, что характерными свойствами пластиковых микрочастиц являются адсорбция и агрегация. Адсорбция, являясь физико-химическим процессом, зависит от площади поверхности, сил Ван-дер-Ваальса и кристалличности материалов. На сорбционные способности МП влияют окружающие условия и длительность пребывания в них, выветривание, окружающие загрязнители и микроорганизмы, а также свойства самих сорбируемых веществ. Считается, что пластики, образованные в результате выветривания, имеют более высокую сорбционную способность из-за особенности приобретенной формы частиц [Wang et al., 2016].

им. М.В. Ломоносова О.В. Ильиной. Образцы отбирали на Баренцевом море (супралитораль, материковая часть, напротив западной оконечности о. Кильдин). МП получали из макрообразцов, используя абразив и сито из нержавеющей стали с размером ячеек 300 мкм, затем микрочастицы пластика отделяли от остатков абразивного материала методом плотностной сепарации в дистиллированной воде и высушивали. Размеры частиц определяли на микрофотографиях с помощью ПО “КОМПАС-3D v14” [Lazareva et al., 2024].

Для проведения исследования применяли следующие методики:

1. Хронический тест в соответствии со стандартными методическими указаниями [2011 (Metodicheskie ukazaniia..., 2011)] с модификациями, способствующими получению данных в объемах, необходимых для проведения более эффективного статистического анализа. Таким образом, выборка особей была увеличена до 30 для каждой повторности, дафнии в количестве по три особи помещались в стеклянные стаканы объемом 150 мл. Основными регистрируемыми параметрами были выбраны выживаемость и плодовитость.

2. Статистическую обработку результатов проводили в программе RStudio (версия 3.5.1), различия между тестовыми группами и контролем были проанализированы с помощью дисперсионного анализа (ANOVA) и специальным тестом Даннета (различия считали значимыми при  $p < 0.05$ ). Расчет полулетальных концентраций проводили с применением пакета Microsoft Office Excel.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании ранее полученных данных, исследование хронического воздействия МП на жизненные показатели *D. magna* было

решено расширить, включив в анализ данные об изменении жизненных показателей последующих поколений. Результаты хронического

теста с учетом реакции последующих трех поколений после кратковременного влияния высоких концентраций МП (50 мг/л) в присутствии ионов меди (0.05 мг Cu/л) представлены в таблице 2.

Условия инкубирования на протяжении всего эксперимента для удобства отображены в таблице 1, обращаем внимание, что данная таблица также является легендой для рисунков 1 и 2.

**Таблица 1.** Условия проведения хронического опыта для выявления последствий кратковременного воздействия частиц МП

**Table 1.** Conditions of the chronic experiment to reveal the effects of short-term exposure to MP particles

Поколение Generation		F0 до 1го помета F0 to 1st litter		F0 после 1го помета, F1–F3 F0 after the 1st litter, F1–F3	
Условия Conditions		МП	Cu	МП	Cu
Номер группы Group number	1	Контроль			
	2	интактный PS, 50 мг/л	–	–	–
	3	контактный PS, 50 мг/л	–	–	–
	4	–	0.05 мг/л	–	0.05 мг/л
	5	интактный PS, 50 мг/л	0.05 мг/л	–	0.05 мг/л
	6	контактный PS, 50 мг/л	0.05 мг/л	–	0.05 мг/л

**Таблица 2.** Биологические показатели ряда поколений *D. magna* в средах с содержанием разных типов МП в концентрации 50 мг/л и добавлением меди (0.05 мг/л) до и после отмывки от МП

**Table 2.** Biological parameters of several generations of *D. magna* in media containing different types of MP at a concentration of 50 mg/L and copper addition (0.05 mg/L) before and after washing from MP

Группа / Group	1	2	3	4	5	6
Параметр Option	Срок появления первого помета, сут. Time of appearance of the first litter, day					
Поколение Generation						
F0	10	10	10	10	10	10
F1	6	6	11	6	6	6
F2	10	8	13	15	10	10
F3	7	7	7	14	10	7
	Средняя суммарная плодовитость особь/самка±SD Mean total fertility ind./female±SD					
F0	36.10±1.71	44.67±2.08	42.60±2.26	35.12±3.46	<b>47.93±1.40</b>	35.97±2.90
% контроля	–	124	118	97	<b>133</b>	110
F1	53.00±3.85	53.57±3.63	<b>34.04±1.31</b>	<b>14.44±2.21</b>	<b>14.18±1.81</b>	<b>22.98±2.70</b>
% контроля	–	101	<b>64</b>	<b>27</b>	<b>27</b>	<b>43</b>
F2	35.85±2.44	32.37±1.81	30.93±1.75	<b>10.00±1.00</b>	30.00±2.70	<b>43.03±5.82</b>
% контроля	–	90	86	<b>28</b>	84	<b>120</b>
F3	57.09±2.71	56.63±1.17	53.35±2.18	<b>1.50±0.76</b>	<b>28.86±4.47</b>	<b>29.42±9.41</b>
% контроля	–	99	94	<b>4</b>	<b>51</b>	<b>52</b>
	Суммарная продолжительность жизни, дафния-сут. Total life span, Daphnia-days					
F0	660	660	649	600	610	620
F1	660	660	660	274	310	366
F2	640	491	484	29	215	208
F3	642	652	634	50	196	149

**Примечание.** Полу жирным шрифтом выделены статистически значимые отличия (Даннетт-тест,  $p < 0.05$ ).

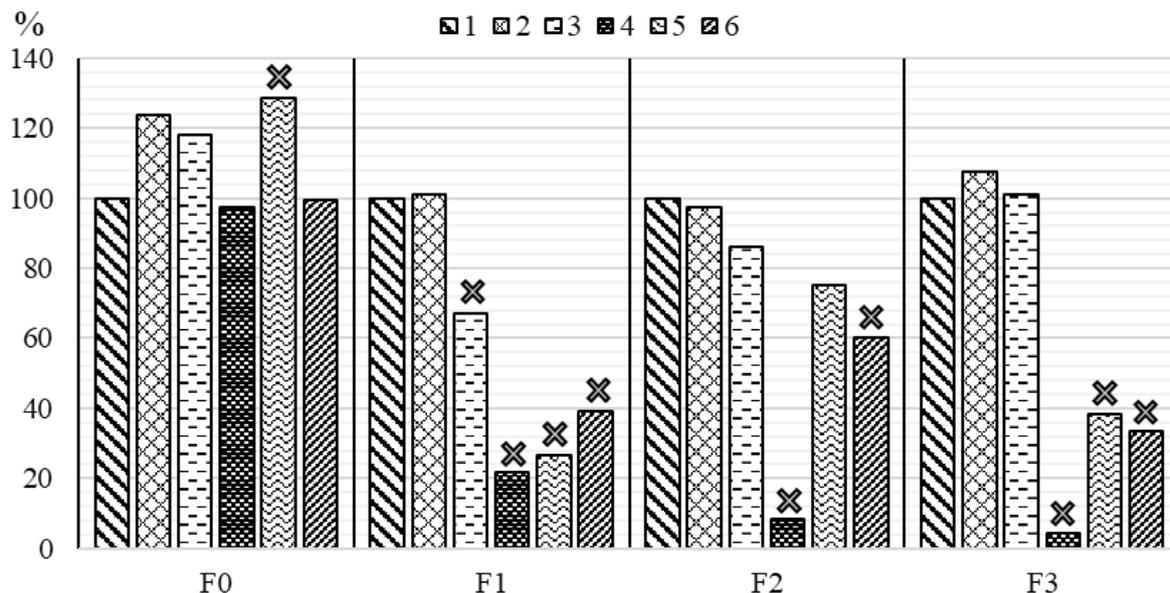
**Note.** Statistically significant differences in bold (Dunnett test,  $p < 0.05$ ).

Оценивая плодовитость (рис. 1), можно отметить, что у самок, происходивших от тех, которые подвергались в F0 воздействию как первичного, так и вторичного МП, отмечается восстановление показателей плодовитости — после воздействия первичного МП в F1, а вторичного МП в F2. В то же время, стоит обратить

внимание на тот факт, что после воздействия вторичного МП в поколениях F1 и F2 наблюдается увеличение сроков появления первого помета. Как отмечает Smirnov [2017] дафниды характеризуются отложенной реакцией снижения плодовитости в стрессовых условиях. При рассмотрении групп, которые в начале

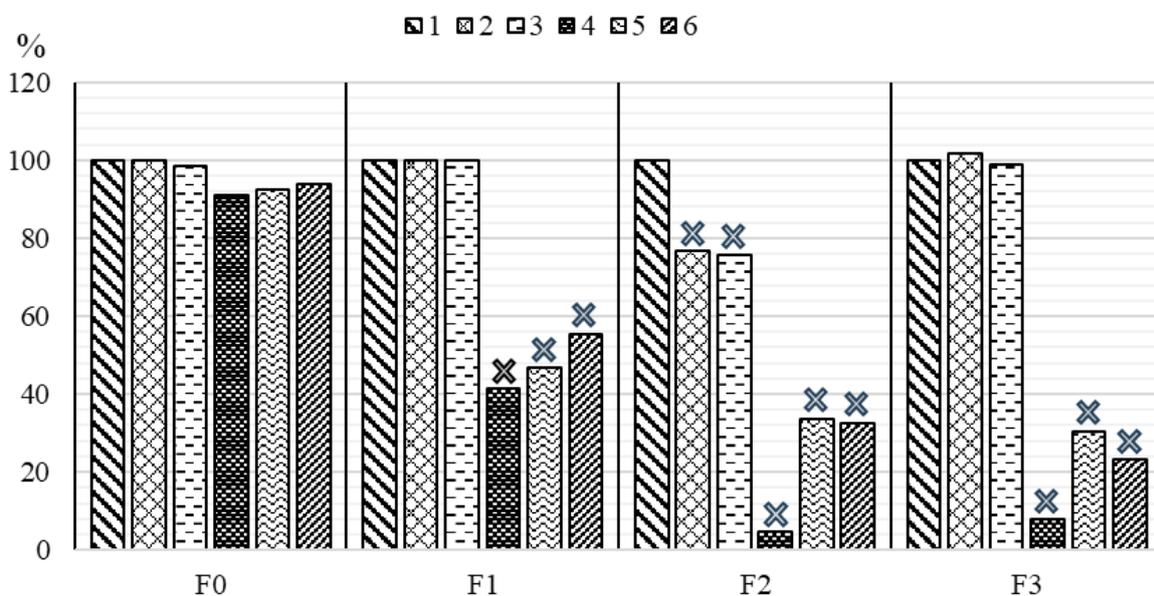
эксперимента подвергались комбинированному действию МП и ионов меди, стоит отметить некоторый протекторный эффект начиная с поколения F2, подчеркнем, что этот эффект

проявляется уже после удаления из среды частиц МП, которые теоретически могли адсорбировать ионы меди и понизить их биодоступность для дафний.



**Рис. 1.** Плодовитость ряда поколений *D. magna* в средах с содержанием разных типов МП в концентрации 50 мг/л и добавлением меди (0.05 мг/л) до и после отмывки от МП. ✕ отмечены статистически значимые отличия от контроля (Даннетт-тест,  $p < 0.05$ ). Условные обозначения как в табл. 1.

**Fig. 1.** Fecundity of several generations of *D. magna* in media containing different types of MP at a concentration of 50 mg/L and addition of copper (0.05 mg/L) before and after washing from MP. ✕ indicate statistically significant differences from the control (Dunnett test,  $p < 0.05$ ). Legend as in Table 1.



**Рис. 2.** Продолжительность жизни особей ряда поколений *D. magna* в средах с содержанием разных типов МП в концентрации 50 мг/л и добавлением меди (0.05 мг/л) до и после отмывки от МП. ✕ отмечены статистически значимые отличия от контроля (Даннетт-тест,  $p < 0.05$ ).

**Fig. 2.** Life expectancy of individuals of several generations of *D. magna* in media containing different types of MP at a concentration of 50 mg/L and addition of copper (0.05 mg/L) before and after washing from MP. ✕ indicate statistically significant differences from the control (Dunnett test,  $p < 0.05$ ). Legend as in Table 1.

Рассматривая показатель продолжительности жизни (рис. 2), можно отметить, что его восстановление в группах 2 и 3 наступает только в поколении F3, что не соответствует срокам восстановления плодовитости. В группах, инкубируемых в присутствии ионов меди, отмечается снижение показателя продолжительности жизни в течение всех наблюдаемых поколений. Однако в группах, которые на ранних сроках инкубировались в присутствии МП, его снижение заметно ниже.

Для установления долгосрочного влияния присутствия частиц МП был проведен опыт, результаты которого представлены в таблице 3. Для приближения условий инкубирования к природным было принято решение уменьшить концентрацию МП до 25 мг/л, а

также использовать только контактный образец полистирола.

Как и после кратковременного воздействия, отмечается снижение плодовитости (рис. 3) в группе, испытывающей влияние контактного PS. Также отмечается протекторный эффект МП в группе 4 при совокупном присутствии в среде МП и ионов меди. Учитывая полученные данные, а также полное вымирание группы 3 (воздействие меди в концентрации 0.05 мг Cu/л) для визуализации протекторного эффекта, выраженного в повышении устойчивости особей к действию ТМ, приводим график изменения численности особей группы 3 и 4 в поколении F0 (рис. 4). Данный протекторный эффект нельзя назвать значительным, однако, он обеспечивает появление потомства в группе 4.

**Таблица 3.** Биологические показатели ряда поколений *D. magna* в средах с содержанием PS контактного в концентрации 25 мг/л и добавлением меди (0.05 мг/л) на протяжении 4-х поколений.

**Table 3.** Biological performance of a number of generations of *D. magna* in media containing PS contact at a concentration of 25 mg/L and copper addition (0.05 mg/L) over 4 generations.

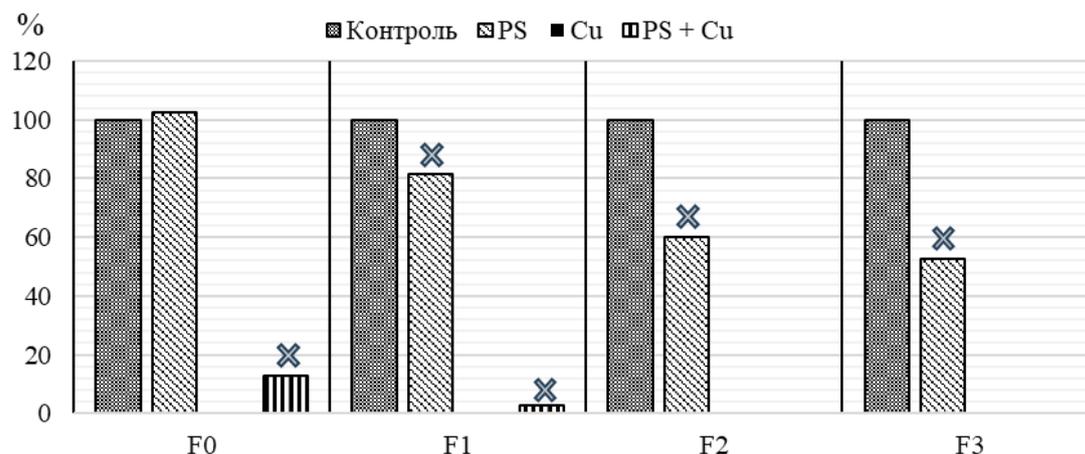
Группа / Group	1 (контроль)	2 (PS 25 мг/л)	3 (Cu 0.05 мг/л)	4 (PS + Cu)
Параметр Option	Срок появления первого помета, сут. Time of appearance of the first litter, day			
Поколение Generation				
F0	9	9	–	20
F1	7	13	–	11
F2	8	10	–	14
F3	9	10	–	–
	Средняя суммарная плодовитость особь/самка±SD Mean total fertility ind./female±SD			
F0	32.20 ±1.79	33.03 ±19.63	0	<b>4.10</b> <b>±8.64</b>
% контроля	–	102.59	0	<b>12.73</b>
F1	56.70 ±3.84	<b>45.57</b> <b>±4.32</b>	–	<b>1.50</b> <b>±2.83</b>
% контроля	–	<b>81.36</b>	–	<b>2.67</b>
F2	52.17 ±5.01	<b>28.00</b> <b>±3.49</b>	–	<b>1.7</b> <b>±2.01</b>
% контроля	–	<b>53.67</b>	–	<b>3.25</b>
F3	40.07 ±4.17	<b>21.74</b> <b>±4.62</b>	–	–
% контроля	–	<b>54.26</b>	–	–

**Примечание.** Полужирным шрифтом выделены статистически значимые отличия (Даннетт-тест,  $p < 0.05$ ).

**Note.** Statistically significant differences in bold (Dunnett test,  $p < 0.05$ ).

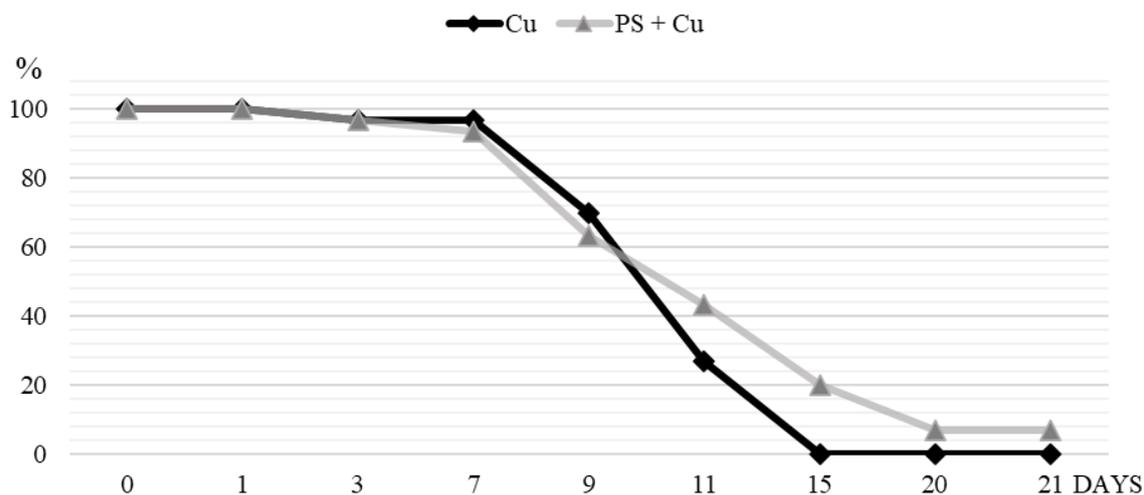
Для оценки изменения чувствительности особей в ряду поколений, были проведены острые тесты со стандартными токсикантами (бихромат калия и SDS) для молоди каждого поколения. Изменение чувствительности оценивали с помощью расчета полулетальных концентраций (ЛК50) за 24 и 48 ч (табл. 4). Выраженных изменений в чувствительности не обнаружено.

В литературе на данный момент недостаточно данных для проведения сравнения полученных результатов. Можно отметить лишь несколько работ близких по содержанию. Так, Martins et al. [2018], проводя исследование влияния первичных МП (сферические частицы с диаметром 1–5 мкм, концентрация в среде 0.1 мг/л) выявили значительные изменения в плодовитости дафний, восстановление показателя произошло в поколении F3.



**Рис. 3.** Плодовитость ряда поколений *D. magna* в средах с содержанием контактного PS в концентрации 25 мг/л и добавлением меди (0.05 мг/л). \* отмечены статистически значимые отличия от контроля (Даннетт-тест,  $p < 0.05$ ).

**Fig. 3.** Fecundity of several generations of *D. magna* in media containing contact PS at a concentration of 25 mg/L and copper addition (0.05 mg/L). \* indicate statistically significant differences from the control (Dunnett test,  $p < 0.05$ ).



**Рис. 4.** График выживаемости *D. magna* поколения F0 в среде, содержащей ионы меди (0.05 мг/л) и PS контактного 25 мг/л.

**Fig. 4.** Graph of survival rate of *D. magna* generation F0 in medium containing copper ions (0.05 mg/L) and PS contact 25 mg/L.

**Таблица 4.** Показатели полулетальных концентраций (за 24 и 48 ч) бихромата калия и додецилсульфата натрия для *D. magna* в ряду поколений

**Table 4.** Rates of semi-lethal concentrations (over 24 and 48 hours) of potassium bichromate and sodium dodecyl sulphate for *D. magna* across generations

Поколение Generation	Контроль / Control				Cu 0.05 мг Cu/л / Cu 0.05 mg Cu/L			
	Cr ЛК 50 (мг/л) Cr LC 50 (mg/L)		SDS ЛК 50 (мг/л) SDS LC 50 (mg/L)		Cr ЛК 50 (мг/л) Cr LC 50 (mg/L)		SDS ЛК 50 (мг/л) SDS LC 50 (mg/L)	
	24 ч	48 ч	24 ч	48 ч	24 ч	48 ч	24 ч	48 ч
F0	1.01	0.79	36.25	14.99	1.18	0.5–1.0	39.81	12.63
F1	1.34	0.5–1.0	42.16	14.99	1.72	0.71	47.53	13.05
F2	1.34	0.70	–	–	1.25	0.5–1.0	–	–
F3	1.91	1.08	34.65	22.10	1.55	1.25	32.13	10.96

Еще одна работа, описанная Schür et al. [2020], проводилась без удаления из среды частиц полистирола на протяжении четырех поколений

(использовался первичный МП, размер частиц не более 63 мкм, концентрация от 2 до 10 тыс. частиц в мл). В работе авторы отмечают

снижение плодовитости особей и полное вымирание популяции к 1–3 поколению. На момент написания работы не найдено публикаций, в которых оценивались бы последствия кратковременного влияния комбинации МП + тяжелый металл.

Рассуждая о причинах повышения устойчивости дафний к воздействию меди после инкубации с МП, необходимо обратиться к работе,

в которой оценивалось влияние МП на протеомном уровне. Используя подход, основанный на масс-спектрометрии, группой исследователей был идентифицирован 41 белок, количество которого значимо увеличивалось после воздействия полистирола. В том числе было обнаружено увеличение нескольких белков, связанных с защитными механизмами от токсических веществ [Trotter et al., 2021].

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных опытов становится более однозначным протекторный эффект МП в присутствии ионов меди. Так, даже кратковременное их воздействие приводит к увеличению продолжительности жизни особей при дальнейшем воздействии высоких концентраций меди — для поколения F3 суммарная продолжительность жизни организмов, инкубируемых с поколения F0 при концентрации меди 0.05 мг/л, составила 50 дафния-сут., для групп, находящихся в тех же условиях, но подвергавшихся в поколении F0 воздействию частиц МП интактных и контактных (50 мг/л) — 196 и 149 дафния-сут. соответственно. При постоянном (на протяжении всех поколений) воздействии частиц контактного

МП (25 мг/л) и ионов меди (0.05 мг/л) отмечается слабый протекторный эффект, который обеспечивает появление потомства в группе МП + медь, при том, что группа, инкубируемая только с ионами меди, вымирает полностью, не оставляя потомства.

Результаты настоящего исследования показывают, что даже кратковременное воздействие МП на популяцию планктонных организмов может вызвать негативные последствия, устранение которых может происходить вплоть до третьего поколения. Смягчение воздействия ионов тяжелых металлов в присутствии МП может снизить эффективность проведения экологического мониторинга.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ им. М.В. Ломоносова при поддержке Программы развития МГУ, проект № 23-Ш07-44.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Казмирук В.Д. Микропластик в окружающей среде: Нарастающая проблема планетарного масштаба. М.: ЛЕНАНД, 2020. 432 с.
- Методические указания по разработке нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. Москва, 2011. 201 с.
- Терехова В.А., Воронина Л.П., Гершкович Д.М. и др. Биотест-системы для задач экологического контроля: методические рекомендации по практическому использованию стандартизованных тест-культур. Москва: Изд-во Доброе слово, 2014. 48 с.
- Lazareva A.M., Rak A.N., Gershkovich D.M. et al. Evaluation of the Toxicity of Microplastics in the Supralittoral of the Barents Sea Using Test Objects of Different Trophic Levels // *Inland Water Biol.* 2024. Vol. 17, №2. P. 307–315. DOI: 10.1134/S1995082924020093.
- Martins A., Guilhermino L. Transgenerational effects and recovery of microplastics exposure in model populations of the freshwater cladoceran *Daphnia magna* Straus // *Sci. Total Environ.* 2018. Vol. 631. P. 421–428. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.054.
- Schür C., Zipp S., Thalau T., Wagner M. Microplastics but not natural particles induce multigenerational effects in *Daphnia magna* // *Environ. Pollut.* 2020. Vol. 260. P. 113904. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.113904.
- Smirnov N. *Physiology of the Cladocera*. Boston, MA: Elsevier, 2017. 401 p.
- Trotter B., Wilde M.V., Brehm J. et al. Long-term exposure of *Daphnia magna* to polystyrene microplastic (PS-MP) leads to alterations of the proteome, morphology and life-history // *Sci. Total Environ.* 2021. Vol. 795. P. 148822. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148822.
- UNEP Year Book 2011: Emerging issues in our global environment, United Nations Environment Programme, Nairobi. Published February 2011 Website: <http://www.unep.org/yearbook/2011>.
- Wang J., Tan Z., Peng J., Qiu Q., Li M. The behaviors of microplastics in the marine environment // *Marine Environmental Research.* 2016. Vol. 113. P. 7–17. DOI: 10.1016/j.marenvres.2015.10.014.

#### REFERENCES

- Kazmiruk V.D. Mikroplastik v okruzhaiushchei srede: Narastaiushchaia problema planetarnogo masshtaba [Microplastics in the environment: A growing problem on a planetary scale]. Moscow, LENAND, 2020. 432 p. (In Russian)

- Lazareva A.M., Rak A.N., Gershkovich D.M. et al. Evaluation of the Toxicity of Microplastics in the Supralittoral of the Barents Sea Using Test Objects of Different Trophic Levels. *Inland Water Biol.*, 2024, vol. 17, no. 2, pp. 307–315. doi: 10.1134/S1995082924020093.
- Martins A., Guilhermino L. Transgenerational effects and recovery of microplastics exposure in model populations of the freshwater cladoceran *Daphnia magna* Straus. *Sci. Total Environ.*, 2018, vol. 631, pp. 421–428. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.054.
- Metodicheskie ukazaniia po razrabotke normativov kachestva vody vodnykh ob'ektov rybokhoziaistvennogo znachenii, v tom chisle normativov predelno dopustimykh kontsentratsii vrednykh veshchestv v vodakh vodnykh ob'ektov rybokhoziaistvennogo znachenii [Methodological guidelines for the development of water quality standards for water bodies of fisheries importance, including standards for the maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fisheries importance]. Moscow, 2011. 201 p. (In Russian)
- Schür C., Zipp S., Thalau T., Wagner M. Microplastics but not natural particles induce multigenerational effects in *Daphnia magna*. *Environ. Pollut.*, 2020, vol. 260, p. 113904. doi: 10.1016/j.envpol.2019.113904.
- Smirnov N. Physiology of the Cladocera. Boston, MA: Elsevier, 2017. 401 p.
- Terekhova V.A., Voronina L.P., Gershkovich D.M. et al. Biotest systems for environmental control tasks: methodological recommendations for the practical use of standardized test cultures. Moscow, Izd. Dobroe slovo, 2014. 43 p. (In Russian)
- Trotter B., Wilde M.V., Brehm J. et al. Long-term exposure of *Daphnia magna* to polystyrene microplastic (PS-MP) leads to alterations of the proteome, morphology and life-history. *Sci. Total Environ.*, 2021, vol. 795, p. 148822. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148822.
- UNEP Year Book 2011: Emerging issues in our global environment, United Nations Environment Programme, Nairobi. Published February 2011 Website: <http://www.unep.org/yearbook/2011>.
- Wang J., Tan Z., Peng J. et al. The behaviors of microplastics in the marine environment. *Marine Environmental Research.*, 2016, vol. 113, pp. 7–17. doi: 10.1016/j.marenvres.2015.10.014.

## COMBINED EFFECT OF POLYSTYRENE PARTICLES AND COPPER IONS ON THE VITAL PARAMETERS OF *DAPHNIA MAGNA* IN A SERIES OF GENERATIONS

A. N. Rak, D. M. Gershkovich, O. V. Ilyina, A. A. Poyarkov

*Lomonosov Moscow State University*

*119234 Moscow, Leninskie Gory, 1, e-mail: rakan@my.msu.ru*

Revised 14.05.2025

The effect of a combination of polystyrene microparticles of various origins and copper ions on the development of classical test objects of the branched crustacean *Daphnia magna* in chronic experiments over four generations was studied. The article considers two variants of the impact of microplastic particles on culture — short-term (exposure during the first seven days) and permanent (over four generations). The effect of short-term exposure was considered for a polystyrene sample taken from the supralittoral of the Barents Sea, as well as for a new sample. In this part of the study, it was assumed that environmental pollution with high concentrations of MP (50 mg/L) is temporary. At the same time, the increased content of copper ions in the water may remain constant. The effect of continuous exposure was evaluated only for samples taken from the environment. In order to bring the experimental conditions closer to natural ones, it was decided to reduce the concentration of MP (25 mg/L). In all cases, the copper ion content in the solution remained constant (0.05 mg/L) throughout all generations. With short-term exposure to MP particles (50 mg/L), a protective effect was observed in the presence of copper ions, expressed in an increase in the life expectancy of individuals compared with groups not exposed to MP. With constant exposure to MP particles (25 mg/L), this effect weakens.

*Keywords:* microplastic, polystyrene, bioassay, *Daphnia magna*