

УДК 594.1(28)+504.05

ВЛИЯНИЕ МИКРОПЛАСТИКА НА ПРЕСНОВОДНЫХ ДВУСТВОРЧАТЫХ МОЛЛЮСКОВ (ОБЗОР)

© 2024 г. Г. М. Чуйко^{a,*}, Н. В. Холмогорова^{b,c}, Г. П. Жариков^d

^aИнститут биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук,
пос. Борок, Некоузский р-н, Ярославская обл., Россия

^bУдмуртский государственный университет, Ижевск, Удмуртская Республика, Россия

^cНациональный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

^dЯрославский государственный медицинский университет, Ярославль, Россия

*e-mail: gchuiko@ibiw.ru

Поступила в редакцию 17.08.2023 г.

После доработки 12.09.2023 г.

Принята к публикации 23.10.2023 г.

Антропогенное загрязнение окружающей водной среды микропластиком является одной из наиболее актуальных, но наименее изученных проблем современной экотоксикологии. В обзоре на основе последних литературных данных проанализированы исследования в области поглощения, биоаккумуляции и биологических эффектов воздействия микропластика у пресноводных двустворчатых моллюсков (Bivalvia). К настоящему времени проведено 22 исследования на представителях трех семейств: Cyrenidae (45), Unionidae (25) и Dreissenidae (30%). Эти исследования представлены полевыми наблюдениями (43.5), натурными (8.7) и лабораторными (47.8%) экспериментами. Показано, что пресноводные двустворчатые моллюски как активные фильтраторы способны поглощать из воды и донных отложений и аккумулировать в мягких тканях (жабрах, гепатопанкреасе) частицы микропластика, воспринимая их в качестве пищевых объектов. Биоаккумуляция микропластика в моллюсках приводит к функциональным и структурным нарушениям в организме. Совместное действие микропластика и других загрязняющих веществ (кадмия, полихлорированных бифенилов, фармакологических препаратов) может вызывать как синергические, так и антагонистические эффекты в биологических ответах моллюсков. Исходя из проведенных исследований, предлагается использовать двустворчатых моллюсков в качестве биоиндикаторов загрязнения пресных вод микропластиком.

Ключевые слова: микропластик, поверхностные пресные воды, двустворчатые моллюски, поглощение, биоаккумуляция, биологические эффекты

DOI: 10.31857/S0320965224050151, **EDN:** XQEZIH

ПРОБЛЕМА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПЛАСТИКОМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Накопление пластикового мусора в окружающей среде — одна из наиболее актуальных, но наименее изученных проблем антропогенного влияния на окружающую среду и биоту. Посто-

янно возрастающее производство и применение во всех сферах человеческой деятельности разнообразных видов пластиков, а также недостаточно эффективная утилизация их отходов привели к интенсивному поступлению пластикового мусора в окружающую среду. В результате данный тип антропогенного загрязнения приобретает все более масштабный и глобальный характер (Brahney et al., 2020; Plastics Europe, 2021). Как и для других загрязняющих веществ, конечным накопителем пластика являются континентальные воды и Мировой океан (Masura et al., 2015; Petersen, Hubbart, 2020; Chen et al., 2022).

Проблему загрязнения окружающей водной среды пластиком впервые обозначили в начале 70-х годов XX столетия. Было показано, что в западной части Саргассова моря в поверхностном слое воды широко распространены пластиковые

Сокращения: АХЭ — ацетилхолинэстераза, ГП — глутатионпероксидаза, ГЛТ_v и ГЛТ_o — глутатион восстановленный и окисленный, ГСТ — глутатион-S-трансфераза, ДО — донные отложения, МДА — малоновый диальдегид; МКП — микропластик, МТТ — металлотионеины (Zn-МТТ — Zn-содержащие МТТ), НАД⁺ — никотинамидадениндинуклеотид окисленный, НАДН — никотинамидадениндинуклеотид восстановленный, НП — нанопластик, ПВХ — поливинилхлорид, ППП — полипропилен, ПСТ — полистирол, ПХБ — полихлорированные бифенилы, ПЭТ — полиэтилен, ПЭТФ — полиэтилентерефталат, СОД — супероксиддисмутаза, ФФ — флорфеникол, ЦФА — ципрофлоксацин, ЭРОД — этоксирезорфуниноксидэтилаза.

частицы, в большинстве имеющие форму гранул диаметром 0.25–0.5 см, их концентрация в среднем составляла 3500 шт./км² и 290 г/км². Протяженность выявленного пятна загрязнения с севера на юг достигала ~1300 км (Carpenter, Smith, 1972). Одновременно было обнаружено пластиковое загрязнение в прибрежных водах южной части Новой Англии (Carpenter et al., 1972).

Дальнейшие исследования показали, что загрязнение пластиком имеет много аспектов, связанных с влиянием на окружающую среду (Cole et al., 2011). Следует отметить, что некоторые из них могут демонстрировать даже положительные эффекты. Например, скопления крупного пластика формируют новые искусственные биотопы, которые активно заселяют разнообразные виды водных организмов, образуя специфические биоценозы. Однако наиболее очевидно негативное воздействие, которое крупный пластиковый мусор, известный как “макропластик”, может оказать на водную среду и биоту. Так, его присутствие в водной среде представляет эстетическую проблему с экономическими последствиями для индустрии туризма и опасность для многих отраслей, связанных с водной средой (например, судоходство, рыболовство, производство энергии, аквакультура), поскольку пластик может привести к повреждению оборудования и значительным экологическим проблемам (Derraik, 2002). Воздействие макропластика на окружающую среду включает: травмы и гибель морских птиц, млекопитающих, рыб и рептилий в результате запутывания и проглатывания пластика (Derraik, 2002; Gregory, 2009); инвазивный перенос аборигенных видов в новую среду обитания на плавающих пластиковых обломках (Derraik, 2002); ухудшение кислородного режима из-за препятствия нормальному газообмену за счет образования искусственных твердых грунтов в результате опускания пластикового мусора на дно (Moore, 2008; Gregory, 2009).

Однако наибольшую опасность для водной биоты представляет не столько крупный пластик, сколько образующиеся при его механической деструкции под действием природно-климатических факторов (физических, химических, биологических) микропластики (МКП) и последующие химические продукты их разложения (Cole et al., 2011; Bergmann et al., 2015; Cai et al., 2022).

В настоящее время к МКП большинство исследователей относят пластиковые частицы <5000 мкм, частицы <1 мкм часто выделяют в отдельную группу — НП. Обе группы пластика подразделяют на первичный (получаемый специально на производстве) и вторичный (образующийся в результате деградации и фрагментации крупного пластика и первичного МКП). Из-за большого разнообразия источников поступления

в окружающую среду загрязнение МКП состоит из гетерогенной смеси синтетических полимеров различных форм, размеров и цветов. Наиболее часто встречаются сферические микропластики и волокна (Ding et al., 2022).

За последние годы появилось большое количество публикаций, рассматривающих различные экологические аспекты присутствия МКП в водной среде, включая обзорные статьи. Однако большинство этих работ проведено на морских экосистемах (Cole et al., 2011; Wright et al., 2013; Bergmann et al., 2015; Зобков, Есюкова, 2018; Guzzetti et al., 2018; Petersen, Hubbart, 2020; Чубаренко и др., 2021; Du et al., 2021 и др.). Исследований МКП во внутренних водах значительно меньше (Wagner et al., 2014; Li et al., 2018; Bellasi et al., 2020; Castro-Castellon et al., 2022). Основная часть таких работ касается классификации МКП, методов отбора и определения содержания, качественного состава и аккумуляции МКП в абиотических компонентах, их миграции, судьбе и др. (Frank et al., 2022). Все еще мало исследований влияния МКП на пресноводных гидробионтов. По данным обзорной работы (Bellasi et al., 2020), соотношение исследований загрязнения разных компонентов морских и пресноводных экосистем следующее: в воде — 75 : 25, в ДО — 80 : 20, в биоте — 87 : 13%. При этом, в публикациях по влиянию МКП на пресноводных гидробионтов преобладают три таксона животных: ракообразные (31), рыбы (18) и моллюски (10%), остальные группы организмов изучены в значительно меньшей степени (Castro-Castellon et al., 2022).

Показано, что МКП распределяется по всем компонентам пресноводных экосистем. Миграция МКП во внутренних водных объектах представляет собой очень сложный процесс (горизонтальный перенос, всплытие, взвешивание в водной толще, седиментацию и захоронение), на который влияют разнообразные абиотические (физические, гидрологические, климатические и др.) факторы (Cai et al., 2022). Конечным абиотическим звеном первичного накопления для большинства типов МКП считают ДО (Van Cauwenbergh et al., 2013, 2015).

В реках ведущую роль в пространственном распределении МКП играют гидрологические условия, включая скорость течения, глубину, характер донных грунтов и другие. Низкие скорости течения и большая глубина способствуют отложению МКП на дне. И наоборот, высокие скорости течения и малая глубина вызывают перемещение осажженного МКП (Walling, 2009). Исследования, проведенные на озерах и водохранилищах Китая (Zhang et al., 2015; Di, Wang, 2018; Xiong, 2018; Zhang et al., 2018), показали накопление МКП в ДО в местах замедления или отсутствия течения. Обилие МКП в ДО увеличивалось по мере при-

ближения к плотине водохранилища (верхний бьеф). В дальнейшем из ДО МКП переносится по трофическим сетям на высшие уровни (Bour et al., 2018; Egbeocha et al., 2018).

Кроме абиотических факторов, существенное влияние на миграцию МКП в водных объектах оказывают живые организмы. Так, организмы-фильтраторы (планктонные ракообразные, двусторчатые моллюски и другие) поглощают МКП из воды (Cole et al., 2011; 2013; Egbeocha et al., 2018), роющие организмы и грунтоеды (олигохеты, личинки хирономид, роющие личинки поленок, двусторчатые моллюски, некоторые ракообразные) — из ДО, аккумулируя его в организме и тем самым вовлекая в пищевую сеть. Последующее движение МКП по пищевым сетям может приводить к его повторному попаданию в водную среду (пеллеты, фекалии). Деятельность роющих бентосных организмов также может вызывать ремобилизацию МКП из ДО и вторичное загрязнение водной толщи. Кроме того, частицы МКП представляют собой удобный субстрат для микроорганизмов и организмов-обрастателей (Thiel, Gutow, 2005), что повышает их пищевую привлекательность для организмов более высоких трофических уровней. Не менее важную роль в распределении частиц МКП по акватории играют заросли водных растений, которые способствуют их локальному концентрированию в прибрежных зонах (Казимирук, 2022).

На всех этапах миграции в водных объектах частицы МКП способны оказывать неблагоприятное воздействие на гидробионтов. Одна из наиболее распространенных групп гидробионтов, находящихся на начальных трофических уровнях и активно поглощающих МКП из воды и ДО, — двусторчатые моллюски (*Bivalvia*) (Su et al., 2018).

В пресноводных экосистемах двусторчатые моллюски играют важную роль в процессах самоочищения, будучи эффективными фильтраторами и биоаккумуляторами загрязняющих веществ (Sheehan, Power, 1999). Накапливая загрязняющие вещества и служа объектами питания для других животных, включая бентосоядных рыб, моллюски представляют собой важное звено в их передаче по трофическим сетям (Farrell, Nelson, 2013). Поэтому они вызывают особый интерес при мониторинге МКП в окружающей водной среде (Li et al., 2015; Sussarellu et al., 2016).

Поглощение частиц МКП продемонстрировано в лабораторных условиях для многих видов морских организмов, в том числе и двусторчатых моллюсков. Так, наличие МКП выявлено в мягких тканях двух видов двусторчатых моллюсков — *Mytilus edulis* L., 1758 и *Crassostrea gigas* (Thunberg, 1793), выращенных в условиях аквакультуры в природной среде и достигших товарного размера (Van Cauwenbergh, Janssen, 2014). Содержание в

них МКП было в среднем 0.36 ± 0.07 и 0.47 ± 0.16 частиц на 1 г сырой массы соответственно.

Благодаря малоподвижному или прикрепленному образу жизни и типу питания, двусторчатые моллюски широко используют в экотоксикологическом биомониторинге состояния водной среды (Klimova et al., 2020). Это позволяет проводить долгосрочные наблюдения за загрязнением водных объектов.

Отмечено (Lusher et al., 2017), что до 2017 г. из 120 рассмотренных исследований МКП в окружающей водной среде только в 22 изучали пресноводные экосистемы. Более того, из общего числа рассмотренных исследований МКП лишь в 27 рассматривали моллюсков и только одно касалось пресноводных видов.

Все вышеизложенное и определило тему настоящей работы, цель которой — восполнить существующий пробел и проанализировать имеющуюся информацию о поглощении, биоаккумуляции и биологических эффектах МКП у пресноводных двусторчатых моллюсков (*Bivalvia*).

ЗАГРЯЗНЕНИЕ МИКРОПЛАСТИКОМ ПРЕСНОВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Известно, что значительная часть пластикового мусора, встречающегося в Мировом океане, образуется на суше и попадает в него за счет переноса континентальными водами (Masura et al., 2015; Petersen, Hubbart, 2020; Chen et al., 2022). Вследствие этого, важный аспект проблемы загрязнения МКП — исследование уровней его содержания в пресных водах и в организмах пресноводных гидробионтов.

Так, исследование пространственного распределения МКП в поверхностных водах водохранилища Три ущелья на среднем участке р. Янцзы (КНР) показало, что содержание частиц МКП достигало от 3407.7×10^3 до 13617.5×10^3 шт./км² на русле р. Янцзы и от 192.5×10^3 до $11\,889.7 \times 10^3$ шт./км² на устьевых участках четырех притоков (Zhang et al., 2015). В целом на устьевых участках притоков содержание МКП было заметно меньше, чем на русле. Обилие МКП на русле реки увеличивалось по мере приближения к плотине и наибольших значений достигало в ее верхнем бьефе. В качественном отношении МКП состоял из смеси частиц ПЭТ, ППП и ПСТ. По сравнению с ранее опубликованными данными ((Eriksen et al., 2013; Free et al., 2014), количество МКП в данном водохранилище было примерно на один–три порядка больше. Это позволяет предположить, что водохранилища, и особенно их приплотинные части, служат местом концентрирования загрязнения МКП.

В настоящее время имеются работы, в которых наряду с исследованием МКП в пресноводных

моллюсках определяли его концентрации в воде и ДО. Так, на разных участках оз. Тайху (КНР) концентрация частиц МКП в воде варьировала в пределах $3.4\text{--}25.8$ шт./л или $1 \times 10^4\text{--}6.8 \times 10^6$ шт./км², в ДО — $11.0\text{--}234.6$ шт./кг сухой массы (Su et al., 2016). Самое высокое среднее содержание МКП зафиксировано в пробах воды из юго-восточной части озера и в ДО из северо-западной. Северо-западная часть озера была в целом наиболее загрязнена, на что указывают высокие концентрации хлорофилла *a* и общего фосфора. Среди МКП преобладали волокна размером $100\text{--}1000$ мкм, по химическому составу — целлофан. Исходя из проведенного авторами анализа имеющейся литературы, уровни МКП в образцах воды оз. Тайху, были самыми высокими из всех обследованных на тот момент пресных озер мира.

Полевые наблюдения в бассейне среднего и нижнего течения р. Янцзы (КНР), показали, что на 21 станции содержание МКП варьировало в пределах $0.5\text{--}3.1$ шт./л в воде и $15\text{--}160$ шт./кг сухой массы в ДО (Su et al., 2018). Доминирующим полимером был ПЭТФ, за ним следовали ППП и ПЭТ в соотношении 33, 19 и 9% общего содержания соответственно. Волокна доминировали среди всех типов МКП, частицы размером $250\text{--}1000$ мкм преобладали в большинстве проб, чаще всего встречались прозрачные и голубые частицы МКП.

Исследование, проведенное на озерах Мид и Мохаве (США), выявило достаточно низкую загрязненность МКП поверхностного слоя воды, но высокую в слое ДО до 33 см: $0.44\text{--}9.7$ шт./м³ и $87.5\text{--}1010$ шт./кг сухой массы соответственно (Baldwin et al., 2020). Волокна были наиболее распространенным типом частиц, их обнаружили во всех образцах. Хотя количество образцов было невелико, повышенные концентрации МКП отмечены в районах, подвергающихся наибольшей антропогенной нагрузке.

В устье р. Милуоки и некоторых ее притоках, а также в прибрежной зоне оз. Мичиган в районе впадения реки содержание МКП в поверхностной воде в зависимости от места отбора проб менялось в среднем в пределах $0\text{--}3$ (Hoellein et al., 2021) и $6\text{--}30$ шт./л (McNeish, 2018). По химическому составу МКП был представлен искусственным шелком, целлюлозой и ПЭТФ, по форме и цвету МКП данные отсутствуют. В пяти равнинных озерах Дании среднее содержание МКП в ДО достигало 28 ± 17 шт./кг сухой массы (Kallenbach et al., 2022), концентрацию в воде не определяли.

Таким образом, приведенные данные показывают, что содержание МКП в воде и ДО пресных водных объектов, где моллюски способны поглощать его, варьирует в пределах $0.1\text{--}25.8$ шт./л и $11.0\text{--}1010$ шт./кг сухой массы соответственно. В расчете на площадь акватории содержание МКП

в поверхностном слое воды может меняться в пределах $1 \times 10^4\text{--}6.8 \times 10^6$ шт./км².

ПОГЛОЩЕНИЕ, БИОАККУМУЛЯЦИЯ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ МИКРОПЛАСТИКА У ПРЕСНОВОДНЫХ МОЛЛЮСКОВ

Анализ литературы по изучению влияния МКП на пресноводных двустворчатых моллюсков показывает, что к настоящему времени все исследования проведены на представителях трех семейств: Cyrenidae (45), Unionidae (25) и Dreissenidae (30%) (табл. 1). Одним из самых распространенных гидробионтов в реках и эстуарных экосистемах мира считается азиатский моллюск *Corbicula fluminea* (O.F. Müller, 1774). Этот моллюск, способный адаптироваться к изменениям окружающей среды, входит в число инвазивных видов в ряде регионов и принят в качестве модели для испытаний на токсичность (Parga et al., 2021).

Обобщая сведения о работах разных аспектов поглощения, биоаккумуляции и биологических эффектов МКП у пресноводных двустворчатых моллюсков, можно констатировать, что проведенные к настоящему времени 22 исследования представлены полевыми наблюдениями (43.5), натурными (8.7) и лабораторными (47.8%) экспериментами. В этих работах участвовали представители 16 стран. Большая часть работ выполнена учеными из США и Канады (рис. 1), чуть меньше — из КНР и Германии. Остальные страны представлены единичными исследователями. В России аналогичных исследований до сих пор не проводили.

Полевые наблюдения

Большая часть всех полевых наблюдений влияния МКП на моллюсков и его биоаккумуляции выполнена на представителях семейств Cyrenidae и Dreissenidae, для сем. Unionidae такие исследования единичны. В подавляющем большинстве работ использован моллюск *Corbicula fluminea* (сем. Cyrenidae) (табл. 1).

На оз. Тайху (КНР) проведены исследования содержания МКП в мягких тканях моллюска *C. fluminea*, обитающего на 13 станциях, две из которых находились на ферме по выращиванию моллюсков (Su et al., 2016). Частицы МКП обнаружены во всех исследованных моллюсках. Минимальные и максимальные уровни МКП в моллюсках на трех участках (северо-западном, центральном, юго-восточном) были $0.2\text{--}12.5$ шт./г влажной массы. Выращенные на ферме и дикие моллюски на одном и том же участке озера не различались по содержанию МКП. Наибольшее количество МКП в моллюсках зафиксировано в северо-западной части озера.

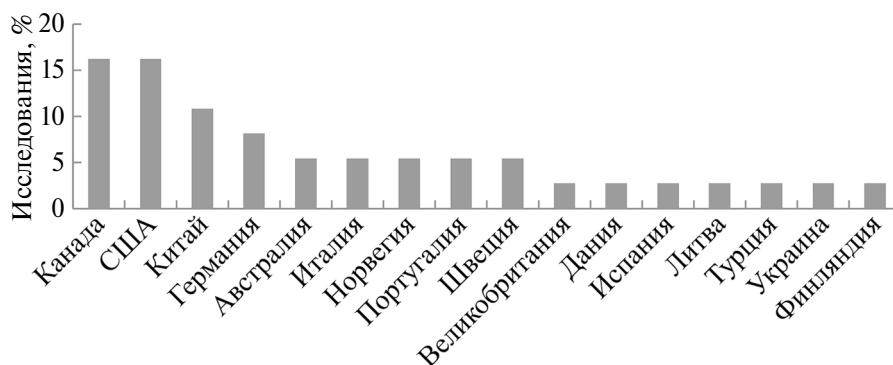


Рис. 1. Распределение по странам числа исследователей, участвующих в работах по влиянию МКП на пресноводных двустворчатых моллюсков.

По химическому составу пластика идентифицированные частицы МКП располагались в ряду: ПЭТФ > терефталевая кислота (ТФК) > ППП. По форме преобладали волокна, достигая 48–84% всего обнаруженного МКП. Чаще других встречались прозрачные и синие частицы (58–70%) размером 100–1000 мкм (~60–65%). Коэффициент биоаккумуляции (соотношение содержания МКП в моллюсках и воде или ДО) колебался от 38 до 3810 и отрицательно коррелировал с содержанием МКП в ДО. Более высокие значения коэффициента биоаккумуляции обнаружены на станциях, где содержание МКП в ДО было ниже. Авторы предполагают, что это явление могло быть одной из причин отсутствия существенных различий по содержанию МКП у моллюсков из разных районов оз. Тайху.

Другое масштабное исследование загрязнения МКП воды, ДО и моллюсков *C. fluminea* проведено на 21 участке в четырех озерах, реках и эстуарии, расположенных в бассейне среднего и нижнего течений р. Янцзы (КНР) (Su et al., 2018). Наличие МКП обнаружено в воде, ДО (табл. 1) и моллюсках, у которых его содержание менялось в пределах 0.3–4.9 шт./г (или 0.4–5.0 шт./особь). Наиболее часто встречались волокна, на их долю приходилось 60–100% всего МКП. Синих и прозрачных частиц было >30% МКП – значительно больше, чем частиц других цветов. Размеры обнаруженных частиц МКП находились в пределах 21–4830 мкм, преобладали частицы в диапазоне 250–1000 мкм. Содержание, распределение по размерам и цвету МКП в моллюсках больше соответствовало этим показателям в ДО, чем в воде. Учитывая способность моллюсков к биоаккумуляции МКП и высокое соответствие качественных и количественных параметров МКП в моллюсках и водной среде, авторы предлагают использовать моллюсков *C. fluminea* в качестве вида-биоиндикатора загрязнения МКП пресноводных систем, особенно ДО.

Исследовано содержание МКП в мягких тканях у двух видов двустворчатых моллюсков

Corbicula fluminea и *Dreissena bugensis* Andrusov, 1897 из оз. Мид, расположенного в бассейне р. Колорадо (США) (Baldwin et al., 2020). Одна станция отлова у этих видов была общая, три других располагались в разных частях озера. Показано, что концентрации МКП у *Corbicula fluminea* менялись в зависимости от места отлова в пределах 18–105 (в среднем 51.7) шт./особь, у *Dreissena bugensis* – 2.7–13.0 (в среднем 8.1) шт./особь, на общей станции содержание МКП у этих видов моллюсков было близким (соответственно 18 и 13 шт./особь).

У всех моллюсков по форме преобладали волокна (80.9), затем следовали пленки (11.4), далее неравномерные фрагменты (6.3) и замыкали ряд вспененные частицы (1.4%). По цветовой гамме распределение было следующим: прозрачные частицы (42.5), синие (23.1), черные (17.8) и красные (4.9%). По форме и цвету МКП в моллюсках больше соответствовал МКП в ДО, чем в воде, по содержанию в теле моллюсков больше коррелировал с таковым в ДО. Биоаккумуляция МКП в моллюсках была выше в районах, подвергающихся большей антропогенной нагрузке.

Изучено содержание МКП в беззубке *Anodonta anatina* (L., 1758), обитающей в р. Хейе (Швеция) (Berglund et al., 2019). Моллюсков отлавливали на двух участках реки. Один (в верховьях, ст. 1) расположен в сельской местности выше населенных пунктов по течению, другой (в низовьях, ст. 2) – ниже по течению от крупного муниципального округа, имеющего городские водоочистные сооружения со сбросом сточных вод в реку. Обнаруженный в моллюсках МКП представляли волокна и сферические гладкие частицы. Размер МКП не указан. Подавляющая часть МКП, выявленная в этом исследовании, приходилась на вторичный пластик. По соотношению различных цветов обнаруженный в беззубке МКП располагался в следующем ряду: черный (29.3% общей доли МКП), прозрачный (24.8), красный (14.3), зеленый (12.9), серый (9.6), синий и фиолетовый (по 4.6%). На обеих станциях цветовой спектр и

Таблица 1. Суммарные данные по исследованию содержания МКП и оценка его влияния на различные параметры биологического состояния пресноводных двустворчатых моллюсков

Вид моллюска	Характеристика МКП			МКП, экотоксикант. Концентрация в воде; содержание в ДО (сухая масса)	Наблюдаемые показатели	Условия и место исследования	Литературный источник
	химический состав	размер, мкм	форма				
<i>Corbicula fluminea</i>	ПЭТ, ЦЛФ	5–5000	ВЛК преобладали (48–84%), СФР	Сем. Syrenidae 3.4–25.8 шт./л; 11.0–234.6 шт./кг, 1×10^4 – 6.8×10^6 шт./км ² ; МКП 2.8–4.2 мг/л; ПХБ 30 нг/г 0.5–3.1 шт./л; 15–160 шт./кг МКП 0.2 и 0.7 мг/л; ФФ 1.8 и 7.1 мг/л 100 и 1000 шт./л 0.44–9.7 шт./м ³ ; 87.5–1010 шт./кг МКП 10 мкг/г, ЦФА 0.5, 5 и 50 мкг/г МКП 2 мг/л, Cd 0.01 мг/л 8.1 $\times 10^{-4}$ шт./л; 0.01, 0.1 и 1.0 мг/л Сем. Unionidae – – –	Поглощение, биоаккумуляция	Полевые наблюдения, оз. Тайху (КНР)	Su et al., 2016
	ПЭТФ, ПСТ, ПЭТ, ПВХ	12–704	ФРГ, механически измельченные		Поглощение, биоаккумуляция (3 сут), биохимия, гистология гепатопанкреаса, пищевое поведение, смертность Биоаккумуляция	Лабораторный эксперимент, 3 и 28 сут	Rochman et al., 2017
	–	21–4830	ВЛК преобладали (60–100%)		Биоаккумуляция, пищевое поведение, гистология гепатопанкреаса и жабр, биохимия	Полевые наблюдения, р. Янцзы (КНР); 5 озер, эстуарная зона Лабораторный эксперимент, 96 ч	Su et al., 2018
	–	1–5	СФР		Поглощение, биоаккумуляция	Лабораторный эксперимент, 48 ч	Guilhermino et al., 2018
	ПЭТФ; ПЭТА; АКР; ПАМ; ВСК; ПВС	5–5000	ВЛК преобладали (81%) СФР		Поглощение, биоаккумуляция	Лабораторный эксперимент, 48 ч	Li et al., 2019
<i>C. javanicus</i>	–	125–5600	ВЛК преобладали (81%) СФР	МКП 10 мкг/г, ЦФА 0.5, 5 и 50 мкг/г МКП 2 мг/л, Cd 0.01 мг/л 8.1 $\times 10^{-4}$ шт./л; 0.01, 0.1 и 1.0 мг/л Сем. Unionidae – – –	Поглощение, биоаккумуляция	Полевые наблюдения, оз. Мид, Мохаве (США)	Baldwin et al., 2020
	ПСТ	0.08, 6	ВЛК преобладали (81%) СФР		Поглощение, раздельное и совместное действие ЦФА и ПСТ в ДО на гистоморфологию и жабр, филътрационная активность, биохимия	Лабораторный эксперимент, 10 сут	Guo et al., 2021
	ПЭТФ, ПЭТВП	≤ 200 1–5000	ФРГ ВЛК; ФРГ		Совместное действие МКП и Cd на активность СОД, ГСТ, АХЭ, ПОЛ Биохимия	Лабораторный эксперимент, 7 сут Лабораторный эксперимент, 24 ч	Raга et al., 2021 Esterhuizen et al., 2022
<i>Anodonta anatina</i>	НЛН, ПСТ	–	ВЛК, СФР	Сем. Unionidae – – –	Биоаккумуляция	Полевые наблюдения, р. Хейе (Швеция)	Berglund et al., 2019
<i>Lasmigona costata</i>	ПВП, ПАК ПДМО, ПЭИ, НЛН 6/6, ПЭТ, ППП, ПСТ; ППП-ПЭТ	50–5000	ФРГ		Биоаккумуляция	Полевые наблюдения, бассейн р. Гранд, провинция Южное Онтарио (Канада)	Wardlaw, Prosser, 2020
<i>Unio pictorum</i>	ПВХ, ППП, ПЭТФ	1–5000	ВЛК, ФРГ		Биоаккумуляция	Садковое содержание <i>in situ</i> в малой реке Северной Баварии, 28 сут и 6 мес	Domogalla-Urbansky et al., 2019

Окончание таблицы 1.

Вид моллюска	Характеристика МКП			МКП, экотоксикант. Концентрация в воде; содержание в ДО (сухая масса)	Наблюдаемые показатели	Условия и место исследования	Литературный источник
	химический состав	размер, мкм	форма				
<i>U. tumidus</i>	ПЭТФ	100–500	ФРГ	МКП 1 мг/л (15–20 шт./л); Ибупрофен 0.8 мкг/л	Биохимия	Лабораторный эксперимент, 14 сут	Matyuniuk et al., 2022
<i>U. stevenianus</i>	–	5–5000	ВЛК, ФРГ, ВСП, СФР	–	Биоаккумуляция	Полевые наблюдения на р. Карасу в бассейне оз. Ван (Турция)	Atici, 2022
Сем. Dreissenidae							
<i>Dreissena polymorpha</i>	ПСТ	1–10	СФР	$116 \times 10^6 - 23 \times 10^9$ шт./л	Поглощение, биоаккумуляция	Лабораторный эксперимент, 6 сут	Magni et al., 2018
<i>D. bugensis</i>	ПСТ	0.2, 1; 2	СФР	1×10^{-12} М; 0.01×10^{-12} М	Поглощение, распределение, выведение, очищение	Лабораторный эксперимент, 24 ч, 21–42 сут	Merzel et al., 2019
<i>D. polymorpha</i>	ПЭТВП	10–45	Порошок	0–0.8 г/л	Поглощение, биоаккумуляция, смертность, скорость фильтрации, размножение, потребление O_2	Лабораторный эксперимент, 24 ч	Pedersen et al., 2020
	ПСТ	≤63	ФРГ, механически измельченные	6.4–100 000 шт./л	Поглощение, биоаккумуляция, смертность, скорость выведения, биохимия, иммунное состояние	Лабораторный эксперимент, 14 сут	Weber et al., 2020
	–	125–5600	ВЛК преобладали (81%)	$0.44 - 9.7$ шт./м ² ; $87.5 - 1010$ шт./кг	Биоаккумуляция	Полевые наблюдения, оз. Мид (США)	Baldwin et al., 2020
<i>D. sp.</i>	ПЭТФ, НЛН, ППП, ПАС, ПВХ	149.61–1807.75	ВЛК, ФРГ	–	Биоаккумуляция	Полевые наблюдения, оз. Изео (Италия)	Pastorino et al., 2020
<i>D. polymorpha</i>	ППП, НЛН, АНТ, ПЭСТ	10– > 25	–	0–3 шт./л	Биоаккумуляция	Натурный эксперимент, 30 и 60 сут, оз. Мичиган, р. Милуоки (США)	Hoellein et al., 2021
	ППП, ПСТ, АЛКД	50–5000	ВЛК, ФРГ	28 ± 17 шт./кг	Биоаккумуляция	Полевые наблюдения, пять равнинных озер (Дания)	Kallenbach et al., 2022
	ППП, ПХП, СПЭА	50–5000	ВЛК, ФРГ	–	Биоаккумуляция	Полевые наблюдения приплотинное оз. Бейхан Дам (Турция)	Atamanalp et al., 2023

Примечание. АКР – акрил, АЛКД – алкидный лак, АХЭ – ацетилхолинэстераза, ВЛК – волокна, ВСК – вискоза, ВСП – вспененные частицы; ГСТ – глутатион-S-трансфераза, ДО – донные отложения, МКП – микропластик, НЛН – нейлон, НЛН 6/6 – поли(гексаметиленадипамид) нейлон 6/6, НП – нанопластик, ПАК – поли(акриловая кислота), ПАМ – полиамид, ПАС – полиамидная смола, ПВП – поли(4-винилпиридин), ПВС – поливиниловый спирт ПВХ – поливинилхлорид, ПДМО – поли(диметилсилоксан), ППП – полипропилен, ПЭИ – полиэфиримид Utem 1000 (технический термопласт), ППП–ПЭТ – сополимер ППП и ПЭТ, ПСТ – полистирол, ПХБ – полихлорированные бифенилы, ПХП – полихлоропрен, ПЭГ – полиэтилен, ПЭТА – полиэтилен амид, ПЭТВП – полиэтилен высокой плотности, ПЭТФ – полиэтилентерефталат, СОД – супероксиддисмутаза, СПЭА – сополимер этилакрилат, СФР – микрофиллеры, ФРГ – неравномерные фрагменты, ФФ – фторфеникол, ЦЛФ – целлофан, ЦФА – ципрофлоксацин.

соотношение цветов были почти идентичным. Пластиковые волокна обнаружены у всех 32 отловленных моллюсков общим числом 1620 шт. Из них 37.5% волокон содержалось в моллюсках, отловленных в верховьях реки (ст. 1), остальные 62.5% — в низовьях (ст. 2). Наибольшее количество волокон, обнаруженных в одном моллюске, достигало 142 шт./особь, наименьшее — 4 шт./особь. Среднее количество волокон в одном моллюске ($x \pm SD$) было 38.0 ± 34.2 и 63.3 ± 29.6 шт./особь на ст. 1 и 2 соответственно. Сферические частицы общим числом 247 шт. обнаружены в 24 из 32 моллюсков. В моллюсках на ст. 1 выявлена только 51 частица, на ст. 2 — 196 частиц. Среднее количество сферических частиц на одного моллюска ($x \pm SD$) достигало 3.2 ± 3.5 и 12.2 ± 9.1 шт./особь на ст. 1 и 2 соответственно. Представленные данные свидетельствуют о связи содержания МКП в моллюсках с общей антропогенной нагрузкой на разные участки реки. По мнению авторов (Berglund et al., 2019), наличие в моллюсках и волокон, и сферических частиц указывает на возможность различного происхождения источников поступления МКП. Меньшее содержание в моллюсках сферических частиц, чем волокон, может быть связано с более низкой их концентрацией в окружающей среде или со слишком малыми для систем фильтрации моллюсков размерами. Выявлена положительная корреляция между размером моллюсков и количеством обнаруженных волокон. Авторы (Berglund et al., 2019) объясняют это тем, что более крупные особи фильтруют большее количество воды и тем самым накапливают больше волокон. Однако связь аккумуляции сферических частиц с размерами моллюсков менее очевидна.

Еще одно исследование посвящено изучению содержания МКП у моллюска *Lasmigona costata* (Rafinesque, 1820) на семи станциях, расположенных в бассейне р. Гранд в провинции Южное Онтарิโอ (Канада) (Wardlaw, Prosser, 2020). Установлено, что в целом содержание МКП было низким. Его частицы обнаружены у 71% обследованных моллюсков, но на каждой станции МКП присутствовал хотя бы у одного моллюска. Наибольшее количество частиц было 7 шт./особь. Станции не отличались по количеству частиц МКП на одного моллюска. Получена значительная положительная связь количества частиц МКП на одного моллюска с размером водосбора выше по течению, но связь с процентом использования городских земель не обнаружена. Размер обнаруженного в моллюсках МКП менялся от 21 до 298 мкм при среднем размере частиц 114 ± 63 мкм ($x \pm SD$). Идентифицированы следующие по химическому составу типы полимеров: поли(4-винилпиридин), поли(диметилсилоксан), поли(акриловая кислота), поли(гексаметиленадипамид) нейлон 6/6, полиэфиримид Ultem 1000 (технический термо-

пласт), ПЭТ, ППП, ПСТ, сополимер ППП и ПЭТ (ППП–ПЭТ). По составу преобладали частицы ППП–ПЭТ, по форме — неравномерные фрагменты. В воде и ДО МКП не исследовали, однако его количество в моллюсках увеличивалось от верхнего течения реки к нижнему. При этом, в местах ниже по течению от городских поселений моллюски содержали наибольшее количество МКП. Данное исследование стало первым, в котором представлены доказательства о способности пресноводного моллюска *L. costata* поглощать различные типы МКП в естественных условиях.

Исследована возможность использования дрейссены (*Dreissena polymorpha* Pallas, 1771) в качестве потенциального биоиндикатора МКП в пресноводных озерах (Pastorino et al., 2021). Образцы отбирали в трех местах, расположенных на северной оконечности оз. Изео (одного из крупных субальпийских озер на севере Италии) на разном удалении от места стоков, поступающих в эту часть озера с водоочистных сооружений на берегу впадающей в озеро р. Оглио. Одна станция располагалась в устье реки в непосредственной близости к стокам (ст. 1), две другие — у противоположного берега озера напротив устья на расстоянии 2 (ст. 2) и 2.5 км (ст. 3) от спуска сточных вод. Собрано 180 особей моллюсков (по 60 шт. с каждой станцией), в которых обнаружено 20 частиц МКП. По химическому составу частицы МКП располагались в следующем ряду: ПЭТФ — 45, нейлон — 20, ППП — 20, полиамидная смола — 10 и ПВХ — 5%. По форме встречались волокна (60) и неравномерные фрагменты (40%). По размеру частицы МКП варьировали в диапазоне 149.61–1807.75 мкм; по цвету распределялись следующим образом: синие — 60, красные — 25, белые — 10, зеленые — 5%. Различий в физико-химических параметрах воды и биометрических характеристиках моллюсков из этих трех мест не выявлено, однако по физико-химическим характеристикам аккумулярованного МКП моллюски заметно различались. Общее количество частиц (N , шт.) и среднее содержание МКП (шт./особь) убывало по мере удаления от места стоков с очистных сооружений от ст. 1 к ст. 3 в следующем порядке (N ; $x \pm SD$): ст. 1 (14 ; 0.23 ± 0.43) > ст. 2 (4 ; 0.07 ± 0.25) > ст. 3 (2 ; 0.03 ± 0.18). Химический состав МКП также различался между участками. Так, ПЭТФ присутствовал на всех трех станциях: ст. 1 — 43, ст. 2 — 50, ст. 3 — 50%, другие соединения (нейлон, полиамидная смола, ППП, ПВХ) встречались только на определенных участках. На ст. 1 обнаружены в равных пропорциях ППП и нейлон (28.5), на ст. 2 — полиамидная смола (50), на ст. 3 — ПВХ (50%). По мнению авторов, химический состав МКП в моллюсках соответствует данным, полученным ранее другими исследователями (Sighicelli et al., 2018) для проб воды из трех основных итальянских субальпийских озер (Маджоре,

Изео и Гарда). Выявлены различия между станциями и по размеру частиц МКП в моллюсках. По среднему, минимальному и максимальному размеру ($x \pm SD$, min–max) станции располагались в следующем порядке: ст. 1 – 867 ± 1231.6 , $149.1–2289.2$ мкм; ст. 2 – 182.4 ± 46.4 , $149.6–215.3$ мкм; ст. 3 – 1735.7 ± 101.9 , $1163.7–1807.2$ мкм.

Изучено загрязнение МКП (50–5000 мкм) ДО и *D. polymorpha* в пяти равнинных пресноводных озерах Дании, различающихся по площади поверхности ($0.38–39.84$ км²), водосборной территории ($49.9–1074.5$ км²), объему воды ($1.23 \times 10^8–5.63 \times 10^6$ м³) и периоду полного водообмена ($0.05–3.1$ /год) (Kallenbach et al., 2022). На водосборной площади озер земли сельхозназначения занимают 45.3–83.8%. Рассчитаны концентрации МКП в ДО и дрейссене, которые были сопоставлены с характеристиками водосбора и параметрами окружающей среды. Всего в ДО пяти озер обнаружена 31 частица МКП, в моллюсках – одна частица, поэтому средние концентрации МКП в ДО и моллюсках были очень низкие: 28 ± 17 шт./кг сырой массы и 0.067 ± 0.249 шт./10 особей соответственно. Вследствие этого, авторам не удалось выявить связь между количеством наблюдаемого МКП в ДО и моллюсках, а также связь между концентрацией МКП в ДО и параметрами окружающей среды. Поскольку все изученные озера получали воду из водосборных бассейнов, подвергшихся умеренному или сильному антропогенному воздействию, ожидалось, что моллюски будут поглощать и накапливать МКП. Однако результаты этого исследования показали, что *D. polymorpha* не загрязнена МКП. Таким образом, по мнению авторов, моллюски не поглощают МКП при низких концентрациях. Сделано предположение, что данные по содержанию МКП в ДО и моллюсках можно объяснить несколькими факторами, связанными с региональными различиями в использовании пластика, характеристиками видов, размером выборки, а также с тем фактом, что в литературе не всегда сообщают об отсутствии МКП. Проведенное исследование дает представление о динамике загрязнения между водосбором, озером и биотой в системах с низкой концентрацией МКП.

Изучено присутствие МКП в мягких тканях *D. polymorpha* на четырех разных станциях в водохранилище Бейхан Дам, образованном на р. Мурат путем строительства дамбы гидроэлектростанции (ГЭС) в Турции (Atamanalp et al., 2023). Первые две станции (ст. 1 и ст. 2) располагались на правом и левом берегу приплотинного участка водоема в 1 км от дамбы ГЭС, ст. 3 и ст. 4 – в 8.3 км и 22 км выше по течению от первых двух соответственно. Отобрано 40 особей моллюсков (по 10 шт. на каждой станции), в которых обнаружено 52 частицы МКП. Общее количество (N , шт.) и среднее содержание ($x \pm SD$ шт./особь или шт./г)

МКП в моллюсках постепенно снижалось в следующем ряду: ст. 1 ($18; 1.80 \pm 0.92$ или 3.47 ± 2.62) > ст. 2 ($16; 1.6 \pm 1.07$ или 2.80 ± 2.17) > ст. 3 ($11; 1.10 \pm 0.74$ или 2.41 ± 2.31) > ст. 4 ($7; 0.70 \pm 0.82$ или 1.06 ± 0.97). Статистически значимые различия наблюдали только между крайними ст. 1 и ст. 4. Установлена статистически значимая высокая положительная корреляция между содержанием МКП (шт./особь и шт./г) и размерами моллюсков. Поскольку степень урбанизации на водосборе исследованного водоема невысокая и представлена в основном относительно равномерно расположенными вдоль озера небольшими поселениями, повышение содержания МКП в моллюсках по мере продвижения вниз по течению свидетельствовало о его концентрировании в приплотинном участке водоема. На всех станциях преобладал черный цвет МКП (50–86), за ним следовал синий (15–36), затем серо-белый (10–20), замыкал ряд красно-розовый (5–7%). Цветовое разнообразие МКП в моллюсках возрастало вниз по течению. Размерный состав МКП менялся в широких пределах – 50–5000 мкм. Наиболее распространенными и присутствующими на всех станциях были частицы размерных диапазонов 501–1000 (10–32%) и 1001–2000 мкм (18–50%). Частицы остальных размеров присутствовали не на всех станциях и в небольшом количестве (<13%). Следует отметить, что частицы крупных размеров (диапазона 2001–3000 и 3001–5000 мкм) присутствовали в моллюсках только в верховьях водоема (ст. 3, ст. 4), в то время как более мелкие частицы обнаружены лишь в моллюсках из приплотинного участка (ст. 1). Эта станция отличалась наивысшим разнообразием частиц МКП и относительно равномерным их распределением по диапазонам. Авторы не объясняют этот феномен. Но, на наш взгляд, он может быть связан с более быстрым оседанием крупных частиц МКП вблизи от мест их локального поступления и концентрированием в придонном слое воды, где они становятся более биодоступными для моллюсков. Более мелкие частицы переносятся течением на большие расстояния и концентрируются в придонном слое вблизи плотины, где течение воды замедляется. Преобладающей формой МКП были волокна (78–100), остальное – неравномерные фрагменты (0–22%). По химическому составу МКП доминировал ППП (53.3), на втором месте был сополимер этилакрилата (33.3), далее – полихлоропрен (13.3%). В целом авторы связывают наличие МКП в моллюсках с антропогенной нагрузкой на водный объект и рекомендуют использовать *D. polymorpha* в качестве индикаторного вида для обнаружения и биомониторинга загрязнения водной среды МКП.

Исследовано содержание МКП в мягких тканях моллюсков *Unio stevenianus* Krynicki, 1837, обитающих на трех станциях в низовье р. Кара-

су на разном расстоянии от ее впадения в оз. Ван (Турция) (Atici, 2022): ст. 1 располагалась в 9 км выше по течению от устья, ст. 2 — примерно в 5 км ниже по течению, ст. 3 — в устье реки. Обследовано 32 особи (ст. 1 — 8 шт., ст. 2 — 10, ст. 3 — 14). У всех моллюсков обнаружен МКП. Всего в мягких тканях найдено 1253 частицы МКП, их количество менялось от 0.81 до 6.69 шт./г (в среднем 2.85 ± 1.27 шт./г) или от 13.00 до 84.73 шт./особь (в среднем 39.15 ± 16.95 шт./особь). Соответствующие значения на ст. 1, 2 и 3 были 269 (22%), 381 (30) и 603 (48) шт., 2.74 ± 1.86 , 2.79 ± 0.79 и 2.96 ± 1.24 шт./г или 33.63 ± 20.41 , 38.08 ± 10.62 и 43.08 ± 18.62 шт./особь. Статистически значимых различий между участками отбора проб не выявлено, хотя тенденция к увеличению всех показателей содержания МКП вниз по течению прослеживалась достаточно четко. В наибольшей степени моллюски поглощали частицы МКП размерных рядов <100, 100–300 и 1000–5000 мкм, их содержание в моллюсках равнялось 1.34 ± 0.34 , 0.51 ± 0.18 и 0.40 ± 0.28 шт./г соответственно. Выявленные различия были статистически значимы ($p \leq 0.05$).

Степень загрязнения моллюсков МКП авторы рассчитывали по индексу MPI (Patterson et al., 2019):

$$MPI = MPSB \times (TW/SW),$$

где MPSB — содержание МКП в мягких тканях (шт./г), TW — сырая масса мягких тканей (г), SW — масса раковины (г).

Значения индекса MPI у моллюсков на исследованных станциях были следующие: ст. 1 — 1.56, ст. 2 — 1.48, ст. 3 — 1.55. Какой-либо корреляции индекса MPI с местоположением станции не выявлено. Химический состав МКП не определяли. В целом во всех моллюсках преобладали частицы МКП размером <100 мкм (44.8%), в наименьшем количестве были выявлены частицы размером 300–500 мкм (7.7%). Частицы остальных размеров 100–300, 500–1000 и 1000–5000 мкм присутствовали примерно в равных долях (17.7, 13.3 и 16.6% соответственно). Доли частиц разных размеров несколько варьировали от станции к станции, но общая тенденция сохранялась. Выявлено увеличение количества большемерных частиц вниз по течению реки. По форме МКП доминировали волокна (47.5) и неравномерные фрагменты (48.8), затем следовали гранулы (3.2), преимущественно сферические, и вспененные частицы (0.5%). Пленки не обнаружены. По цвету частицы МКП распределялись следующим образом: черные — 48.8%, синие — 37, прозрачные — 10.8, красные — 1.6, белые — 0.8, желтые и серые — по 0.3, зеленые и коричневые — по 0.2. Представленные данные показали, что в экосистеме р. Карасу присутствует МКП и моллюски *U. stevenianus* могут поглощать его из окружающей среды и служить биоиндикаторами пластикового загрязнения.

Экспериментальные исследования в полевых условиях *in situ*

Исследовали поглощение частиц МКП (<5 мм) пресноводными двусторчатыми моллюсками *Unio pictorum* (L., 1758) (сем. Unionidae) в условиях природного эксперимента *in situ* (Domogalla-Urbansky et al., 2019). Моллюсков приобретали на ферме, специализирующейся по их разведению (Германия). Далее рассаживали по две особи в специальные садки и помещали либо непосредственно в стоки на станции очистки сточных вод (группа 1), либо в реку в 245 м вверх по течению (группа 2) и 1100 м вниз по течению от места сброса сточных вод (группа 3). Контрольную группу моллюсков (группа 4) содержали в садках в пруду. Пробы моллюсков для анализа отбирали через 28 сут и 6 мес.

За период исследования всего было обнаружено 454 частицы размером >50 мкм и 2597 частиц <50 мкм. Из них 5 частиц идентифицировано как пигменты, 11 частиц — как МКП. В группе 1 после 28 сут экспозиции обнаружена 1 частица ППП >50 мкм, 1 волокно ПЭТФ и 2 частицы пигмента, через 6 мес — 1 частица ППП >50 мкм, 7 частиц ПВХ <50 мкм, частицы пигмента отсутствовали. В группах 2–4, размещенных в реке и пруду, за весь период эксперимента частиц МКП не обнаружено, только пигменты. По мнению авторов, полученные результаты свидетельствует о достаточно низком уровне загрязнения МКП сточных вод и реки вблизи их выпуска, на что указывает отсутствие или низкое содержание МКП в моллюсках. Также делается заключение, что моллюски могут использоваться как природные биологические тест-организмы для мониторинга загрязнения МКП сточных и речных вод.

Изучали содержание частиц МКП (<5 мм) и трех классов загрязнителей (алкилфенолов, полициклических ароматических углеводородов и нефтяных маркеров) в организме моллюсков *Dreissena spp.* (*D. polymorpha* и *D. bugensis*; до вида не идентифицированы) в литоральной зоне на озере Мичиган (США) в районе Милуокской гавани (Hoellein et al., 2021). Моллюсков размером от 5 до >25 мм отлавливали в четырех условно чистых местах с минимальным антропогенным загрязнением (УЧ), сажали в садки, разделяя на 5 размерных групп с шагом 5 мм, и размещали их на участках, подверженных воздействию сточных вод с очистных сооружений (ст. 1) и городских неорганизованных стоков (ст. 2). В начале эксперимента содержание МКП в моллюсках на УЧ местах было в среднем <1 шт./особь и сходным у разных размерных групп. Через 30 сут экспонирования обнаружено, что содержание МКП возросло по сравнению с началом эксперимента в среднем в 2.5. раза и было выше у более крупных моллюсков на ст. 1, чем на ст. 2. Однако через 60 сут содер-

жение МКП в моллюсках снизилось до исходных уровней, и различия между ст. 1 и 2 уже не выявлялись. Содержание МКП и концентрации химических загрязняющих веществ в моллюсках не коррелировали между собой. Обнаруженная динамика содержания МКП в моллюсках, экспонированных в сточных водах, видимо, указывает на то, что моллюски не только могут поглощать, но и выводить МКП из организма. Это, по мнению авторов, ограничивает возможность использования двустворчатых моллюсков для долгосрочного мониторинга МКП в сточных водах. Однако этот вопрос требует дальнейшего изучения.

Экспериментальные исследования в лабораторных условиях *in vivo*

Действие МКП на моллюсков. Изучены особенности поглощения азиатским моллюском *Corbicula fluminea* (сем. Cyrenidae) волокон МКП с различными физико-химическими свойствами в концентрациях 100 и 1000 шт./л (Li et al., 2019). Моллюсков для эксперимента отлавливали в оз. Дианшэн (КНР). Для получения МКП использовали шесть различных полимеров: черный полиэфирамид, красный ПЭТФ, черный акрил, синий полиамид, красный искусственный шелк (вискоза) и белый поливиниловый спирт. Сырье измельчали ножницами на кусочки как можно меньшего размера. Для экспериментов полученный МКП разделяли на пять классов в зависимости от длины их волокон: I – 5–100 мкм, II – 101–250 мкм, III – 251–500 мкм, IV – 501–1000 мкм и V – 1001–5000 мкм. Во всех экспериментах применяли две концентрации МКП: 100 и 1000 шт./л. Показано, что из шести различных типов МКП моллюски поглощают ПЭТФ (4.1 шт./г сырой массы) в большей степени, чем другие полимеры. При экспонировании моллюсков с ПЭТФ разных размерных классов выявлено, что максимальное поглощение волокон (1.7 шт./г) было в диапазоне 100–250 мкм. Эти результаты свидетельствуют, что физико-химические свойства (химический состав полимера и его размер) играют важную роль в поглощении МКП моллюсками. Авторы рекомендуют учитывать свойства МКП, используемого в лабораторных экспериментах с моллюсками, с целью сделать его воздействие “экологически значимым”, то есть похожим на встречающееся в природе.

В лабораторных экспериментах изучено влияние МКП на пресноводных моллюсков *C. javanicus* (Mousson, 1849) (Esterhuizen et al., 2022). Моллюсков, выращенных в аквакультуре на о. Ява (Индонезия) и экспортированных в Германию, приобретали в магазине аквариумистики. Исследовали действие волокон МКП в концентрации 8.1×10^{-4} шт./л и неравномерных фрагментов в концентрациях 0.01, 0.1 и 1 мг/л. Волокна получали в результате ручной стирки в водопроводной

воде изделий одежды из ПЭТФ (коммерческое название полиэстер) и последующего их концентрирования при пропускании воды через фильтр с диаметром пор 0.45 мкм. Источником неравномерных фрагментов служили крышки из полиэтилена высокой плотности красного, синего и желтого цветов, механически размельченные и просеянные через сита для получения фракции размером 1–5000 мкм. Варианты эксперимента с неравномерными фрагментами включали частицы каждого цвета отдельно в трех концентрациях. После 24 ч экспозиции моллюсков с МКП в их мягких тканях регистрировали биомаркеры состояния окислительного стресса – активность ГСТ и каталазы.

Результаты показали, что экспонирование моллюсков к волокнам привело через 24 ч к повышению относительно контроля активности каталазы и ГСТ на 75.8 и 39.4% соответственно. При воздействии на моллюсков неравномерных фрагментов ПЭТ высокой плотности красного и синего цветов характер изменений активности ферментов различался, но не зависел от цвета частиц. Так, активность каталазы демонстрировала тенденцию к снижению во всех исследованных концентрациях, но статистически значимые изменения зарегистрированы только при концентрации 0.1 мг/л: на 56.3 и 58.8% соответственно. Активность ГСТ незначительно варьировала около контрольного уровня независимо от концентрации МКП. При действии неравномерных фрагментов ПЭТ высокой плотности желтого цвета активность снижалась во всех вариантах опыта, но статистически значимое снижение каталазы на 45 и 49% было при концентрациях 0.01 и 1 мг/л соответственно, а ГСТ – на 57–68% при всех концентрациях. Зависимость “концентрация–эффект” не зарегистрирована ни в одном случае. По мнению авторов (Esterhuizen et al., 2022), более выраженное изменение в активности обоих ферментов при действии на моллюсков желтого МКП связано с большей токсичностью входящего в его состав желтого красителя. Все варианты воздействия МКП на моллюсков выявили неблагоприятные эффекты у биомаркеров состояния окислительного стресса, что указывает на негативные экотоксикологические последствия загрязнения пресных вод МКП.

Проведено лабораторное исследование влияния двух смесей (МИКС) первичных ПСТ микросфер у *Dreissena polymorpha* (сем. Dreissenidae) из оз. Ловере (Северная Италия) в течение 6 сут экспозиции (Magni et al., 2018). Первая смесь (МИКС 1) содержала микросферы МКП 1 и 10 мкм в концентрации 5×10^5 шт./л каждого размера, вторая (МИКС 2) – 2×10^6 шт./л. Регистрировали поглощение МКП и изменения значений ряда показателей: у биомаркеров состояния окислительного стресса – активность ферментов СОД,

каталаза, ГП, ГСТ, содержание карбонильных групп, продуктов перекисного окисления липидов; биомаркеров нейротоксичности — содержание нейротрансмиттера дофамина, серотонина и глутамата, активность АХЭ и моноаминоксидазы; биомаркеров генотоксичности — частота встречаемости микроядер в клетках.

Исследование показало, что при поглощении МКП концентрируется в просвете кишечника экспонированных моллюсков, абсорбируется и переносится сначала в ткани, а затем в гемолимфу. Установлено, что МКП не вызывает изменений значений биомаркеров состояния окислительного стресса и генетического повреждения, за исключением значительной модуляции активности каталазы и ГП у моллюсков, подвергшихся воздействию МИКС 1. Что касается нейротоксичности, зарегистрировано только значительное увеличение концентрации дофамина у моллюсков, подвергшихся воздействию обоими видами смесей. Это предполагает возможное участие данного нейротрансмиттера в процессе элиминации накопленных частиц МКП. Проведенное исследование — первое изучение токсических эффектов первичного МКП у *D. polymorpha*. Необходимы дополнительные исследования, касающиеся долгосрочных неврологических эффектов первичного МКП.

Исследованы особенности поглощения, биоаккумуляции и выведения микросфер НП и МКП из флуоресцентного карбоксилированного вспененного ПСТ размером 200, 1000 и 2000 нм дрейссеной *D. rostriformis bugensis* Andrusov, 1897, отловленной в озерах Мичиган и Гурон (США) (Merzel et al., 2020). Данный пластик выбран авторами из-за его высокой встречаемости в природных водах. В эксперименте использовали размерный диапазон СФР, лежащий на границе МКП (> 1000 нм) и НП (<1000 нм). Исследовали следующие концентрации СФР: 1×10^{-12} М (6×10^{10} шт./100 мл) для 200 и 1000 нм (НП) и 0.01×10^{-12} М (6×10^8 шт./100 мл) для 2000 нм (МКП). Хотя это выше, чем содержание НП и МКП в природных пресных поверхностных водах, но близко к тому, что может встречаться в сточных водах очистных сооружений. Время экспозиции в МКП/НП было 24–72 ч. Показано, что дрейссена активно поглощает гранулы НП/МКП размерного диапазона 200–2000 нм и перемещает их через пищеварительный тракт, не отличая от пищевых частиц. Микросферы НП/МКП обнаружены на гистологических препаратах флюоресцентным методом в реснитчатых бороздках жабр, в просвете кишечника и в выводном сифоне. Интенсивность поглощения НП/МКП была прямо пропорциональна времени экспозиции к нему и обратно — размеру частиц. В наибольшем количестве моллюски поглощали частицы размером 200 нм, содержание частиц 2000 нм было минималь-

ным, но они образовывали крупные агрегаты. В среднем за 24 ч и 72 ч моллюски поглощали и накапливали частицы НП/МКП в 10–100 раз меньше их содержания в культуральной воде: 5×10^9 , 6×10^8 и 1×10^7 шт./особь соответственно для частиц 200, 1000 и 2000 нм. В процессе поглощения наиболее интенсивно частицы размером 1000 нм накапливались во всех трех органах, 2000 нм — в кишечнике и сифоне, 200 нм — только в кишечнике. Выведение из пищеварительного тракта с фекалиями и псевдофекалиями частиц НП/МКП размером 200 и 1000 нм после прекращения контакта моллюсков с ними происходило в течение 21 сут и 44 сут соответственно, частиц МКП 2000 нм, концентрация которых в воде была в 100 раз меньше, чем частиц двух других размеров, — в течение 20 сут. По истечении этого времени в фекалиях и псевдофекалиях моллюсков частиц НП/МКП не обнаруживали. Хотя на 90% частицы НП/МКП выводились из моллюсков, оставшая часть оставалась в органах, что свидетельствует о пролонгировании частиц в ткань и о возможности их долгосрочной биоаккумуляции и передачи далее по трофическим сетям. Особенно ярко это выражено для частиц размером 1000 нм, несколько меньше — размером 2000 нм и в наименьшей степени — 200 нм. Наиболее интенсивно гранулы НП/МКП всех размеров аккумулировались в тканях выводного сифона. Авторы заключают, что использование таких организмов-фильтраторов как двусторчатые моллюски — наиболее многообещающий и перспективный метод для оценки уровней загрязнения НП/МКП водных объектов, включая пресные. Существующие в настоящее время физические методы оценки с использованием планктонных тралов имеют множество ограничений и могут вносить большую погрешность в конечный результат.

Комбинированное действие МКП и экотоксикантов

Уязвимость двусторчатых моллюсков к загрязнителям обычно оценивают при их раздельном воздействии в лабораторных экспериментах. Однако в природе хронический стресс в условиях повышенной антропогенной нагрузки и воздействие комплекса загрязняющих веществ могут существенно изменить реакцию моллюсков. Для оценки таких воздействий проводят сложные лабораторные эксперименты с несколькими загрязнителями.

Сем. Cyrenidae. Экспериментально изучено влияние на двусторчатого моллюска *Corbicula fluminea* экологически значимых концентраций различных типов МКП отдельно и при сорбировании на них полихлорированных бифенилов (МКП + ПХБ), а также возможность передачи накопленных в моллюсках ассоциированных с МКП загрязняющих веществ по трофической

цепи — белому осетру *Acipenser transmontanus* Richardson, 1836 (Rochman et al., 2017). Моллюсков для эксперимента отлавливали в р. Пута-Крик в г. Дэвис, осетр получен с рыбоводческой фермы (Калифорния, США). По химическому составу исследованы следующие полимеры: ПЭТФ, ПЭТ, ПВХ и ПСТ с ПХБ (вместе и отдельно). Продолжительность экспозиции для биоаккумуляции в моллюсках МКП была 3 сут, биологических эффектов — 28 сут. Цвет полимеров не указан. Частицы МКП получали путем механического размельчения соответствующих по химическому составу полимеров. Форма частиц не дана, но исходя из способа их получения, это были преимущественно неравномерные фрагменты и гранулы. Распределение размеров и среднее значение для каждого типа МКП были близкими, но не идеально однородными из-за различий в физических свойствах и способах размельчения полимеров. Размеры ПЭТФ достигали 12–704 мкм (в среднем 198 мкм), ПЭТ — 14–704 мкм (209), ПВХ — 80–704 мкм (169), ПСТ — 68–704 мкм (179). Эти диапазоны размеров МКП были схожи с таковыми в природных водных объектах. Часть полученного МКП была насыщена смесью конгенов копланарных ПХБ (меченные по ^{13}C ПХБ № 77, 81, 126 и 169) для достижения конечной концентрации 30 нг/г. По сообщению авторов, такие концентрации ПХБ обнаруживают в МКП после 1 года их пребывания в водах залива Сан-Диего (Калифорния, США). Концентрации частиц в эксперименте для ПЭТФ, ПЭТ, ПВХ и ПСТ достигали 4.1, 2.8, 4.2 и 3.2 мг/л соответственно. По мнению авторов, это соответствовало максимальному содержанию МКП в окружающей водной среде в расчете на количество частиц — ~100 шт./л. После 3 сут экспозиции каждый из исследуемых четырех видов МКП был обнаружен во всех экспериментальных моллюсках (по 5 экз. на каждый вид МКП), в контрольной группе пластик отсутствовал. В среднем в каждом моллюске присутствовало 5 ± 6 ($x \pm SD$) частиц ПЭТФ, 8 ± 6 частиц ПЭТ, 3 ± 3 частицы ПВХ и 4 ± 3 частицы ПСТ. Различные типы МКП адсорбировали на себе разное количество исследованных конгенов ПХБ: ПЭТ — 18–21 нг/г, ПСТ — 13–16 нг/г, ПЭТФ и ПВХ — 7–8 нг/г. К сожалению, в конце эксперимента (28 сут) авторы не определяли содержание МКП в тканях моллюсков, а только анализировали концентрацию ПХБ и биологические эффекты на разных уровнях: иммуногистохимическом, гистологическом, поведенческом, функциональном и целом организма (смертность).

После 28 сут экспозиции ПХБ не обнаружены в тканях ни моллюсков, ни осетров. Данный факт, по мнению авторов, теоретически может быть объяснен тремя возможными причинами: 1) накопленные дозы ПХБ были ниже предела обнаружения газохроматографическим методом; 2) за

период экспозиции произошла метаболическая трансформация и выведение ПХБ из организма; 3) адсорбированные на МКП ПХБ биологически не были доступны для поглощения моллюсками. При этом, биомаркер воздействия на организм диоксинподобных ПХБ — индукция ферментов биотрансформации ксенобиотиков, относящихся к группе СYP450, не была зафиксирована у моллюсков ни в варианте опыта только с МКП, ни в варианте МКП + ПХБ. Это подтверждает результаты, указывающие на отсутствие действующих доз ПХБ в тканях моллюсков.

Еще один биомаркер — содержание вителлогенина, указывающий на степень подготовленности организма моллюсков к нересту, также не продемонстрировал никаких изменений в результате воздействия как МКП, так и МКП + ПХБ. На гистологическом уровне выявлено присутствие частиц МКП в желудке всех моллюсков в обоих вариантах эксперимента, что предполагает, по мнению авторов, задержку частиц МКП в желудочно-кишечном тракте моллюсков ≥ 48 ч после их поглощения. Из 90 исследованных моллюсков выявлено легкое расширение канальцев в пищеварительной железе у 23 экз., умеренное — у 12 и сильное — у 2. Обнаружена тенденция увеличения числа гистологических аномалий в обоих вариантах опыта по сравнению с контролем. У контрольных моллюсков наблюдали только легкие аномалии, у экспонированных к МКП — легкие и умеренные, при действии МКП + ПХБ — все варианты эффектов. Наиболее сильные аномалии отмечены у моллюсков, на которых воздействовали комбинацией ПХБ + ПВХ или ПХБ + ПСТ. У одного моллюска, экспонированного к ПВХ + ПХБ, развилась трубчатая дегенерация. В целом выявленные гистологические аномалии, по мнению авторов, были вызваны не только действием ПХБ. В среднем у моллюсков, подвергшихся воздействию МКП, было зарегистрировано в 3 раза больше аномалий, чем у других. Пищевое поведение моллюсков, оцениваемое по потреблению ими одноклеточной водоросли *Pavlova* sp., не выявило статистически значимых различий между вариантами опыта. Смертность моллюсков и в контроле, и в опыте не различалась (3–10%).

Исследовано поглощение и действие используемого в аквакультуре противомикробного ФФ, МКП и их смесей (ФФ + МКП) на моллюска *C. fluminea* (Guilhermino et al., 2018). Источником МКП служили красные флуоресцентные микросферы диаметром 1–5 мкм (коммерческий продукт), химический состав которых авторы не указывают, но, исходя из коммерческого описания продукта производителем, это — аминоформальдегидный полимер. Моллюсков для экспериментов собирали в р. Миньо на северо-западе Пиренейского п-ова (Португалия). В лабораторных условиях их подвергали воздействию ФФ (1.8

и 7.1 мг/л), МКП (0.2 и 0.7 мг/л) или смеси этих двух веществ (МКП + ФФ) в таких же концентрациях в течение 96 ч.

Для оценки биологических эффектов использовали следующие показатели: изменение пищевого поведения по интенсивности поглощения смеси микроводорослей (*Chlorella vulgaris* Beijerinck 1890) и *Chlamydomonas reinhardtii* (Р.А. Dang., 1888), гистопатологические нарушения в пищеварительной системе и жабрах, активность ферментов холинэстераз и уровень перекисного окисления липидов в мышце-замыкателе; содержание МДА и активность ферментов изоцитратдегидрогеназы и октопиндегидрогеназы в ноге, содержание МДА и активность ферментов ГСТ, глутатионредуктазы, ГП и каталазы в жабрах и гепатопанкреасе.

Через 96 ч у всех моллюсков, подвергшихся антимикробной обработке, в организме обнаруживали ФФ ($\sim 2 \pm 1$ мкг/г). Частицы МКП найдены в кишечнике, просвете пищеварительной железы, соединительной ткани, гемолимфатических синусах и слизи на внешней поверхности жабр животных. Количественной оценки содержания МКП в тканях моллюсков авторы не дают. Препарат ФФ вызывал значительное ингибирование активности холинэстеразы ($\sim 32\%$). У животных, подвергшихся воздействию МКП в концентрации 0.2 мг/л, наблюдали ингибирование активности холинэстеразы (31%), хотя другие значимые изменения отсутствовали. При концентрации 0.7 мг/л смеси ФФ + МКП отмечено угнетение питания (57–83%), значительное ингибирование холинэстеразы (44–57%) и активности изоцитратдегидрогеназы, повышение активности антиоксидантных ферментов (ГСТ, ГР, ГП, каталазы) и уровня продукта перекисного окисления липидов МДА. Гистологические нарушения отсутствовали во всех вариантах эксперимента. Результаты показали, что *C. fluminea* способна поглощать ФФ и МКП из воды и может накапливать или, по крайней мере, сохранять их в организме в течение ≥ 96 ч. Оба компонента по отдельности оказывают негативное влияние на *C. fluminea*, а смесь ФФ + МКП обладает синергическим эффектом. Риск негативного воздействия на *C. fluminea* и других двустворчатых моллюсков, а также питающихся ими хищников и человека возрастает в водных объектах, загрязненных ФФ и МКП.

Экспериментально исследовано комбинированное действие на двустворчатого моллюска *C. fluminea* МКП/НП и антибиотика ЦФА, ассоциированных с ДО при экспозиции 10 сут (Guo et al., 2021). Моллюсков для эксперимента отлавливали в р. Мо Ян (провинция Гуандун, Китай). Источником МКП/НП служили коммерческие продукты флуоресцентного ПСТ: микросферы диаметром 80 нм (НП) и 6 мкм (МКП). Цвет

микросфер не указан. Для экспонирования моллюсков к препаратам использовали искусственный грунт, насыщенный МКП/НП (10 мкг/г), ЦФА (0.5, 5 и 50 мкг/г) или их смесью МКП/НП + ЦФА (10 + 0.5, 10 + 5 и 10 + 50 мкг/г) и приготовленный в соответствии с рекомендациями Организации экономического сотрудничества и развития (ОЕСД, 2004). У моллюсков регистрировали следующие показатели: гистоморфометрические и гистопатологические изменения в гепатопанкреасе и жабрах, фильтрационная активность, биохимические биомаркеры в гепатопанкреасе (параметры состояния окислительного стресса: содержание продукта перекисного окисления липидов МДА, ГЛТ_в, активность антиоксидантных ферментов СОД, каталазы, ГП, глутатионредуктазы, ГСТ), показатель нейротоксичности – активность фермента АХЭ).

К концу экспозиции частицы МКП/НП обнаруживали внутри гепатопанкреаса и жабр. Количественную оценку их содержания не проводили, но гистологические препараты указывали на активное поглощение МКП/НП моллюсками. Элементы окислительного повреждения и нейротоксичности отмечены у моллюсков при разных вариантах воздействия МКП/НП и ЦФА. Так, при действии только НП активность ГП повышалась, СОД и глутатионредуктазы снижались, значения остальных биомаркеров не отличались от контрольных. Действие только МКП проявлялось несколько по-другому: активность каталазы и ГСТ повышалась, а ГП снижалась. Значения остальных биомаркеров не изменялись. Действие ЦФА было более выраженным, чем отдельно у МКП/НП при всех концентрациях. При наименьшей концентрации (0.5 мг/л) активность каталазы и глутатионредуктазы снижалась, СОД, ГП, ГСТ и содержание ГЛТ_в повышались, активность АХЭ и уровень МДА оставались неизменными. Увеличение концентрации ЦФА (5, 50 мг/л) приводило к усилению его влияния на исследуемые биомаркеры. Совместное действие ЦФА и МКП/НП вызывало еще больший негативный эффект. Прежде всего, заметно возрастала нейротоксичность, также усиливалось окислительное повреждение гепатопанкреаса.

Гистоморфологические изменения в гепатопанкреасе продемонстрировали наиболее выраженную негативную реакцию организма моллюсков на действие всех исследованных препаратов на клеточном уровне. При отдельном действии ЦФА в зависимости от концентрации к концу эксперимента наблюдали заметную вакуолизацию или растворение эпидермиса наряду с увеличением или расширением просвета пищеварительного канала и уменьшением толщины его эпителия. Степень выявленных нарушений носила дозозависимый характер. При отдельном экспонировании моллюсков с НП отмечали

небольшие нерегулярные и расширенные просветы, при экспонировании с МКП в некоторых пищеварительных каналах происходила вакуолизация.

При комбинированном действии ЦФА и МКП/НП в пищеварительных клетках регистрировали более тяжелые патологические изменения, чем при отдельном их воздействии. Существенную дегенерацию пищеварительных каналов наблюдали у моллюсков уже при экспонировании к НП + 0.5 мкг/г ЦФА. В то же время, в варианте МКП + 0.5 мкг/г ЦФА отмечены лишь незначительные изменения, большинство клеток сохраняли нормальное состояние и только несколько клеток были деформированы, что сопровождалось небольшой гемолитической инфильтрацией соединительной ткани. При экспонировании моллюсков в более высоких концентрациях смеси препаратов почти все клетки имели сильные повреждения, проявлялись гиперплазия, гипертрофия и некроз каналов гепатопанкреаса, гемолитическая инфильтрация соединительной ткани. В целом степень повреждения клеток гепатопанкреаса при экспонировании моллюсков к НП + ЦФА во всех вариантах концентраций была более сильной, чем к МКП + ЦФА.

Из-за своих функций пищеварения и детоксикации гепатопанкреас уязвим для прямого повреждения после воздействия различных загрязняющих веществ. Поскольку гистопатологические нарушения появляются в результате глубоких изменений на физиологическом и биохимическом уровнях (Zhang et al., 2020), авторы связывают выраженные гистоморфологические изменения в гепатопанкреасе моллюсков с выведенными и хорошо согласующимися с ними изменениями в биомаркерах состояния окислительного стресса. По их мнению, при действии МКП/НП и ЦФА, особенно в комбинированном варианте, способность системы антиоксидантной защиты гепатопанкреаса моллюсков нейтрализовать образование активных форм кислорода была ниже интенсивности их образования. Результатом этого стало значительное окислительное повреждение клеток, выразившееся впоследствии в серьезных гистопатологических изменениях в тканях гепатопанкреаса.

Скорость фильтрации *C. fluminea* была значительно снижена в зависимости от концентрации при всех вариантах эксперимента, что может быть связано с ингибированием активности АХЭ. Наблюдали взаимодействия между ЦФА и МКП/НП. Присутствие МКП снижало токсичность ЦФА в ткани, но усугубляло ингибирование скорости фильтрации *C. fluminea* в комбинации с НП. Кроме того, токсичность ЦФА для *C. fluminea* снизилась, поскольку концентрация свободного растворенного ЦФА уменьшилась в присутствии

МКП/НП). В целом данное исследование свидетельствует о значительной роли двусторчатых моллюсков при оценке экологического риска присутствия МКП/НП в водной среде и указывает на потенциальные проблемы безопасности пищевых продуктов, вызванные комбинированным загрязнением окружающей среды пластиком и такими фармакологическими препаратами, как антибиотики.

В работе (Parra et al., 2021) экспериментально оценено влияние кадмия (Cd; 0.01 мг/л), МКП (2 мг/л) и их смеси (Cd + МКП; 0.01+2 мг/л) на *C. fluminea* при экспозиции 7 сут. Моллюсков для эксперимента отлавливали в р. Туа на речном пляже у г. Мирадесес в северо-западной части Пиренейского п-ова (Португалия). Частицы МКП получали путем механического измельчения ПСТ и отбора фрагментов размером ≤ 200 мкм за счет просеивания через соответствующее сито. Такой размер частиц, по мнению авторов, отражает размер пищевых частиц, используемых моллюсками в естественной среде. Источник ПСТ для получения частиц не указан. Содержание активных форм кислорода, показатели состояния окислительного стресса (активность СОД, каталазы, ГСТ, содержание ГЛТ (ГЛТ_в + ГЛТ_о) и индекс окислительного стресса, равный соотношению ГЛТ_в/ГЛТ_о), продуктов перекисного окисления липидов, преимущественно МДА), изменения активности ферментов лактатдегидрогеназы и АХЭ, связанных соответственно с энергетическим обменом и нейротоксичностью, определялись в жабрах, гепатопанкреасе и гонадах. По окончании эксперимента оценивали концентрацию Cd в воде и в мягких тканях моллюсков. Содержание МКП в воде и тканях не анализировали.

Результаты показали, что Cd, МКП и их смеси влияют на энергетический обмен, оказывают нейротоксическое действие и вызывают окислительный стресс во всех исследованных органах моллюсков. Наиболее однозначные изменения наблюдали в активности лактатдегидрогеназы и АХЭ. Так, активность лактатдегидрогеназы заметно снижалась во всех вариантах опыта. Наиболее выраженное и почти одинаковое снижение отмечено при действии Cd и МКП. В случае действия их смеси активность фермента повышалась в жабрах и гепатопанкреасе или оставалась на низком уровне в гонадах, но при этом не достигала контрольных значений. То есть, в первых двух органах происходило антагонистическое взаимодействие Cd и МКП, проявляющееся в некотором ослаблении биологического эффекта. Реакция АХЭ на действие Cd и его смеси с МКП была одинаковой и выражалась в подавлении ее активности приблизительно наполовину, в то время как действие МКП вызывало обратный эффект — повышение активности фермента на 31–58% (жабры, гепатопанкреас), или она оставалась на

контрольном уровне (гонады). Это также указывает на антагонистическое взаимодействие между двумя факторами в отношении АХЭ.

У биомаркеров состояния окислительного стресса наиболее выраженные изменения во всех органах наблюдали при действии Cd отдельно и смеси Cd + МКП, наименее выраженные — при действии МКП. Изменения в разных органах для некоторых биомаркеров носили разнонаправленный характер. В наибольшей степени реагировала на все варианты воздействия СОД, активность которой снижалась во всех вариантах эксперимента и во всех органах. Содержание активных форм кислорода повышалось в жабрах и пищеварительной железе при действии Cd и Cd + МКП, а при действии только МКП — не отличалось от контроля, и во всех случаях снижалось в гонадах. Активность каталазы повышалась относительно контроля в гепатопанкреасе при всех воздействиях, в жабрах — при действии только МКП и смеси Cd + МКП, в гонадах — только смеси Cd + МКП, но снижалась под влиянием МКП. В жабрах и гонадах при действии одного Cd она оставалась неизменной. Активность ГСТ повышалась, а индекс оксидативного стресса снижался во всех органах при действии Cd и Cd + МКП. При действии только МКП значения ГСТ во всех органах и индекса оксидативного стресса в гонадах не менялись, в жабрах и гепатопанкреасе индекс оксидативного стресса повышался.

По результатам исследования авторы предлагают выбрать в качестве биомаркеров загрязнения окружающей среды для Cd ферменты СОД, ГСТ, АХЭ и МДА, для МКП — повышение значений индекса оксидативного стресса и активности АХЭ. Совместное воздействие Cd и МКП вызывало синергетический эффект в жабрах и гонадах, тогда как в гепатопанкреасе регистрировали реакцию антагонизма. Результаты дают новые идеи для раскрытия биологического воздействия тяжелых металлов, МКП и их смесей на *C. fluminea*. Кроме того, авторы продемонстрировали, что этот моллюск может быть хорошим биоиндикатором загрязнения пресноводной среды МКП.

Сем. Unionidae. Проведены лабораторные эксперименты по изучению отдельного и комплексного влияния МКП и фармакологического препарата ибупрофена на моллюсков *Unio tumidus* Philipson, 1788 из двух популяций. Одна популяция обитала в относительно чистых условиях (“Ч”), другая — при повышенном уровне загрязнения (“З”) (Martyniuk et al., 2022). Популяция “Ч” находилась в верхнем течении р. Случь (бассейн р. Припять), протекающей по сельской местности, популяция “З” — в среднем течении р. Ничлава (бассейн р. Днестр), протекающей по высоко урбанизированной местности (Украина).

Для экспериментов использовали частицы МКП ПЭТФ размером 100–500 мкм в концентрации 1 мг/л, аптечный ибупрофен в концентрации 0.8 мкг/л или их смесь (МКП + ибупрофен) в этих же концентрациях при экспозиции 14 сут. Частицы МКП получали за счет механического измельчения пластиковых бутылок и последующего их просеивания через сита с соответствующим диаметром пор. В качестве биомаркеров для оценки состояния моллюсков использовали показатели, которые измеряли в пищеварительной железе: содержание НАДН и НАД⁺, общее содержание МТТ и Zn-МТТ, параметры состояния окислительного стресса (общая антиоксидантная способность, содержание ГЛТ_в, ГЛТ_о и редокс-индекс как их соотношение), активность ферментов апоптоза каспазы-3 и катепсина D, ферментов биотрансформации ксенобиотиков ЭРОД и ГСТ, общей метаболической активности цитратсинтазы.

Контрольные группы моллюсков из двух популяций без дополнительного воздействия показали значительные различия. У моллюсков из популяции “З” по сравнению с таковыми из популяции “Ч” выявлены более низкие уровни содержания НАДН и НАД⁺ и их соотношения, общей антиоксидантной способности, МТТ, активности ЭРОД, ГСТ, внелизосомального катепсина D и цитратсинтазы, но более высокие уровни содержания ГЛТ_в, ГЛТ_о, Zn-МТТ, активности каспазы-3 и общего катепсина D. Вместе с тем, значения редокс-индекса и содержания Zn у них были сходными. По мнению авторов, эти данные показывают, что моллюски из популяции “З” находятся в состоянии хронического стресса.

При разных вариантах воздействия моллюски из разных популяций по комплексу биомаркеров имели существенные различия, хотя по некоторым из них реакция была сходной. При отдельном воздействии МКП в обеих популяциях отмечено отсутствие реакции по сравнению с контрольными значениями по уровню общей антиоксидантной способности, содержанию Zn-МТТ, активности каспазы-3, ГСТ и цитратсинтазы. По другим показателям реакция была сходной: снижение содержания НАД⁺, повышение НАДН и, как результат, снижение их соотношения НАД⁺/НАДН, повышение активности общего и внелизосомального катепсина D. По остальным показателям реакция между популяциями различалась. У популяций “З” и “Ч” соответственно: содержание ГЛТ_в не изменялось и повышалось; ГЛТ_о — повышалось и не изменялось; редокс-индекс оставался неизменным и повышался, хотя и имел тенденцию к снижению; содержание МТТ возрастало и снижалось; содержание Zn возрастало и не изменялось; активность ЭРОД снижалась и не изменялась.

Воздействие ибупрофена отдельно показало у моллюсков из обеих популяций отсутствие реакции относительно контроля для общей антиоксидантной способности и редокс-индекса, содержания ГЛТ_в и Zn-МТТ. Реакция других показателей была сходная: снижение общей активности МТТ и повышение внелизосомального катепсина. По остальным показателям реакция между популяциями различалась. У популяций “З” и “Ч” соответственно снижалось и не изменялось содержание НАД⁺ и соотношение НАД⁺/НАДН; повышалось и не изменялось содержание НАДН и ГЛТ_о, активность общего катепсина D, ГСТ и цитратсинтазы, не изменялось и возрастало содержание Zn; не изменялась и снижалась активность ЭРОД и каспазы-3.

При совместном действии МКП и ибупрофена для обеих популяций отмечено отсутствие реакции по сравнению с контролем для НАДН и редокс-индекса. Сходные ответы выявлены по следующим биомаркерам: снижение — НАД⁺, НАД⁺/НАДН и МТТ, повышение цитратсинтазы. По другим показателям реакция между популяциями различалась. У популяций “З” и “Ч” соответственно: повышались и не изменялись значения общей антиоксидантной способности, Zn и общего катепсина D; не изменялась и снижалась активность каспазы-3, ЭРОД, ГСТ; снижался и повышался ГЛТ_в, не изменялись и повышались внелизосомальный катепсин D, ГЛТ_о и Zn-МТТ.

Полученные результаты позволили авторам заключить, что ответ моллюсков *U. tumidus* из двух популяций на раздельное воздействие ибупрофен и МКП больше зависит от уровня общей антропогенной нагрузки, при которой до этого находилась популяция, чем от специфики действия каждого вещества. В обеих популяциях моллюсков комбинированное воздействие МКП и ибупрофена усиливало реакцию биомаркеров по сравнению с их раздельным действием. Длительное нахождение популяции моллюсков в условиях повышенной антропогенной нагрузки увеличивает их устойчивость к последующему воздействию в лабораторных условиях других загрязнителей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ текущей литературы показал, что на настоящий момент проведено 22 исследования на пресноводных двустворчатых моллюсках трех семейств: Cyrenidae (45), Unionidae (25) и Dreissenidae (30%). Исследования представлены полевыми наблюдениями (43.5), полевыми (8.7) и лабораторными (47.8%) экспериментами. В этих работах участвовали ученые 16 стран, большая часть которых была из США и Канады (по 16%), несколько меньше — из КНР (10.8) и Германии (8.1). Осталь-

ные страны представлены единичными исследователями.

Проведенные исследования показали присутствие в заметных количествах МКП в пресноводных объектах, где обитают двустворчатые моллюски. Содержание МКП и в воде, и в ДО может меняться в широких пределах — 0.1–25.8 шт./л и 11.0–1010 шт./кг сухой массы соответственно. В расчете на площадь акватории вариабельность содержания МКП в поверхностном слое воды может достигать $(1 \times 10^4) - (6.8 \times 10^6 \text{ шт./км}^2)$. По форме МКП наиболее часто встречаются волокна и неравномерные фрагменты, по химическому составу — полиэстер и полиэтилен, по цвету — прозрачный, синий и черный пластик.

Пресноводные двустворчатые моллюски как активные фильтраторы способны поглощать и аккумулялировать частицы МКП, которые, по-видимому, воспринимаются ими как пищевые объекты. В природных условиях в моллюсках присутствуют частицы МКП любого химического состава, формы, размера и цвета, но чаще прозрачные и синие волокна или неравномерные фрагменты полиэстера размером ~1000 мкм. Частицы МКП локализуются в жабрах, кишке, гепатопанкреасе, выпускном сифоне и непосредственно в тканях. Последнее более характерно для частиц <2 мкм.

В лабораторных условиях эксперименты проводили в основном со сферическими частицами МКП в размерном диапазоне 5–5000 мкм. Если у моллюсков был выбор, они предпочитали для поглощения МКП в виде волокон, по химическому составу — полиэстер, размерному ряду — 100–250 мкм. Среди ответных биологических показателей на действие МКП наиболее часто анализировали биомаркеры: состояния окислительного стресса: активность ферментов СОД, каталазы, ГП, ГСТ, ГР, содержание карбонильных групп, глутатиона (восстановленного и окисленного), продуктов перекисного окисления липидов (МДА). В некоторых исследованиях регистрировали биомаркеры нейротоксичности: содержание дофамина, серотонина и глутамата, а также активность ферментов АХЭ и моноаминоксидазы. Используются биомаркеры энергетического обмена: активность ферментов изоцитратдегидрогеназы, октопиндегидрогеназы, лактатдегидрогеназы; содержание НАДН и НАД⁺, общее содержание МТТ и Zn-содержащих МТТ, активность ферментов каспазы-3 и катепсина D, ферментов биотрансформации ксенобиотиков ЭРОД и ГСТ, общей метаболической активности цитратсинтазы; биомаркеры генотоксичности — частота встречаемости микроядер в клетках. И еще один биомаркер — содержание вителлогенина, указывающий на степень подготовленности организма моллюсков к размножению. Дополнительно

исследовали изменение пищевого поведения по интенсивности поглощения смеси микроводорослей, скорость фильтрации, гистопатологические нарушения в пищеварительной системе и жабрах. Частицы МКП обнаруживали в кишечнике, просвете гепатопанкреаса, соединительной ткани, гемолимфатических синусах и слизи на внешней поверхности жабр животных. Зависимость “концентрация—эффект” не выявлена ни в одном случае.

В ряде работ изучено совместное действие МКП и химических загрязняющих веществ: фармакологические препараты (флорфеникол, ципрофлоксацин, ибупрофен; полихлорированные бифенилы, кадмий). В некоторых случаях смеси флорфеникола с МКП вызывали более сильные эффекты, чем каждый из них. Установлено, что ПХБ, хотя и адсорбировались на МКП, но их накопление в организме моллюсков не выявлено, что может быть связано с биоаккумуляцией ПХБ в моллюсках за небольшой период экспозиции в концентрациях ниже предела обнаружения или с их бионедоступностью при сорбции на МКП. Показано, что моллюски способны накапливать лекарственный препарат, флорфеникол, МКП и их смесь, что вызывает изменения в организме животных. Использование смеси усиливает биологические эффекты, зарегистрированные при их раздельном воздействии. Усиление биологических эффектов отмечено и при совместном действии на моллюсков антибиотика ципрофлоксацина и МКП. В некоторых случаях, например, смеси Cd и МКП, для ряда биологических ответов показано антагонистическое взаимодействие, проявляющееся в ослаблении биологического эффекта. Обнаружено, что популяции моллюсков из разных по степени антропогенной нагрузки участков водного объекта по ряду биомаркеров могут по-разному реагировать на действие МКП, фармакологического препарата ибупрофена и их смеси. Интенсивность биологического ответа моллюсков в большей степени зависит от уровня общей антропогенной нагрузки, при которой до этого находилась популяция, чем от специфики действия каждого вещества. Длительное нахождение популяции моллюсков в условиях повышенной антропогенной нагрузки увеличивает их устойчивость к последующему воздействию других загрязнителей в лабораторных условиях.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках плановой бюджетной темы № г/р 121050500046-8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Зобков М.Б., Есюкова Е.Е. 2018. Микропластик в морской среде: обзор методов отбора, подготовки и

анализа проб воды, донных отложений и береговых наносов // Океанология. Т. 58. № 1. С. 149.
<https://doi.org/10.7868/S0030157418010148>

Казмирук В.Д. 2022. Почему в зарослях макрофитов много микропластика: действующие механизмы // Матер. I Всерос. конф. с междунар. участием “MicroPlasticsEnvironment — 2022” (МРЕ-2022), 02–06 августа 2022 г., п. Шира, Хакасия. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та. С. 43.

Чубаренко И.П., Есюкова Е.Е., Хатмуллина Л.И. и др. 2021. Микропластик в морской среде. М.: Науч. мир.

Atamanalp M., Kokturk M., Gündüz F. et al. 2023. The Use of zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) as a sentinel species for the microplastic pollution of freshwater: the case of Beyhan Dam Lake, Turkey. Sustainability 15, 1422.
<https://doi.org/10.3390/su15021422>

Atici A.A. 2022. The first evidence of microplastic uptake in natural freshwater mussel, *Unio stevenianus* from Karasu River, Turkey // Biomarkers. V. 27. Issue 2. P. 118.
<https://doi.org/10.1080/1354750X.2021.2020335>

Baldwin A.K., Spanjer A.R., Rosen M.R. et al. 2020. Microplastics in Lake Mead National Recreation Area, USA: Occurrence and biological uptake // PLoS ONE. V. 15(5). e0228896.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0228896>

Bellasi A., Binda G., Pozzi A. et al. 2020. Microplastic contamination in freshwater environments: A review, focusing on interactions with sediments and benthic organisms // Environments. V. 7. № 4.
<https://doi.org/10.3390/environments7040030>

Berglund E., Fogelberg V., Nilsson P.A. et al. 2019. Microplastics in a freshwater mussel (*Anodonta anatina*) in Northern Europe // Sci. Total Environ. V. 697. 134192.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134192>

Bergmann M., Gutow L., Klages M. 2015. Marine Anthropogenic Litter. Cham: Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3>

Bour A., Avio C.C., Gorbi S. et al. 2018. Influence of habitat, feeding mode and trophic level // Environ. Pollut. V. 243. P. 1217.

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.09.115>

Brahney J., Hallerud M., Heim E. et al. 2020. Plastic rain in protected areas of the United States // Science. V. 368(80). P. 1257.

<https://doi.org/10.1126/science.aaz5819>

Cai Y., Li C., Zhao Y. 2022. A Review of the migration and transformation of microplastics in Inland Water Systems // Int. J. Environ. Res. Public Health. V. 19(1). P. 148.
<https://doi.org/10.3390/ijerph19010148>

Carpenter E.J., Anderson S.J., Harvey G.R. et al. 1972. Polystyrene spherules in coastal waters // Science. V. 178(4062). P. 749.
<https://doi.org/10.1126/science.178.4062.749>

Carpenter E.J., Smith K.L. 1972. Plastics on the Sargasso Sea surface // Science. V. 175. P. 1240.
<https://doi.org/10.1126/science.175.4027.1240>

- Castro-Castellon A.T., Horton A.A., Hughes J.M.R. et al. 2022. Ecotoxicity of microplastics to freshwater biota: Considering exposure and hazard across trophic levels // *Sci. Total Environ.* V. 816. P. 151.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151638>
- Chen M., Yue Y., Bao X. et al. 2022. Microplastics as contaminants in water bodies and their threat to the aquatic animals: a mini-review // *Animals.* V. 12. P. 2864.
<https://doi.org/10.3390/ani12202864>
- Cole M., Lindeque P. 2013. Microplastic ingestion by zooplankton // *Environ. Sci. Technol.* V. 47. № 12. P. 6646.
<https://doi.org/10.1021/es400663f>
- Cole M., Lindeque P., Halsband C. et al. 2011. Microplastics as contaminants in the marine environment: A review // *Mar. Pollut. Bull.* V. 62. Issue 12. P. 2588.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025>
- Derraik J.G.B. 2002. The pollution of the marine environment by plastic debris: a review // *Mar. Pollut. Bull.* V. 44(9). P. 842.
[https://doi.org/10.1016/s0025-3226\(02\)00220-5](https://doi.org/10.1016/s0025-3226(02)00220-5)
- Di M., Wang J. 2018. Microplastics in surface waters and sediments of the Three Gorges Reservoir, China // *Sci. Total Environ.* V. 616–617. P. 1620.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.150>
- Ding J., Sun C., Li J. et al. 2022. Microplastics in global bivalve mollusks: A call for protocol standardization // *J. Hazardous Materials.* V. 438. P. 129490.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129490>
- Domogalla-Urbansky J., Anger P.M., Ferling H. et al. 2019. Raman microspectroscopic identification of microplastic particles in freshwater bivalves (*Unio pictorum*) exposed to sewage treatment plant effluents under different exposure scenarios // *Environ. Sci. Pollut. Res.* V. 26. P. 2007.
<https://doi.org/10.1007/s11356-018-3609-3>
- Du S., Zhu R., Cai Y. et al. 2021. Environmental fate and impacts of microplastics in aquatic ecosystems: A review // *RSC Adv.* V. 11. P. 15 762.
<https://doi.org/10.1039/d1ra00880c>
- Egbeocha C.O., Malek S., Emenike C.U. et al. 2018. Feasting on microplastics ingestion by and effects on marine organisms // *Aquat. Biol.* V. 27. P. 93.
<https://doi.org/10.3354/ab00701>
- Eriksen M., Mason S., Wilson S., et al. 2013. Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian Great Lakes // *Mar. Pollut. Bull.* V. 77. P. 177e182.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.10.007>
- Esterhuizen M., Buchenhorst L., Kim Y.J. et al. 2022. In vivo oxidative stress responses of the freshwater basket clam *Corbicula javanicus* to microplastic fibres and particles // *Chemosphere.* V. 296. P. 134 037.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134037>
- Farrell P., Nelson K. 2013. Trophic level transfer of microplastic: *Mytilus edulis* (L.) to *Carcinus maenas* (L.) // *Environ. Pollut.* V. 177. P. 1.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2013.01.046>
- Frank Y., Ershova A., Batasheva S. et al. 2022. Microplastics in freshwater: a focus on the Russian inland waters // *Water.* V. 14. P. 3909.
<https://doi.org/10.3390/w14233909>
- Free C.M., Jensen O.P., Mason S.A. et al. 2014. High-levels of microplastic pollution in a large, remote, Mountain Lake // *Mar. Pollut. Bull.* V. 85. P. 156.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.06.001>
- Gregory M.R. 2009. Environmental implications of plastic debris in marine settings: entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions. *Philosophical Transactions of the Royal Society. B* // *Biol. Sci.* V. 364. P. 2013.
<https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0265>
- Guilhermino L., Vieira L.R., Ribeiro D. et al. 2018. Uptake and effects of the antimicrobial florfenicol, microplastics and their mixtures on freshwater exotic invasive bivalve *Corbicula fluminea* // *Sci. Total Environ.* V. 622–623. P. 1131.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.020>
- Guo X., Cai Y., Ma C. et al. 2021. Combined toxicity of micro/nano scale polystyrene plastics and ciprofloxacin to *Corbicula fluminea* in freshwater sediments // *Sci. Total Environ.* V. 789.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147887>
- Guzzetti E., Sureda A., Tejada S. et al. 2018. Microplastic in marine organism: environmental and toxicological effects // *Environ. Toxicol. and Pharmacol.* V. 64. P. 164.
<https://doi.org/10.1016/j.etap.2018.10.009>
- Hoellein T., Rovegno C., Uhrin A.V. et al. 2021. Microplastics in invasive freshwater mussels (*dreissena* sp.): spatiotemporal variation and occurrence with chemical contaminants // *Frontiers in Mar. Sci.* V. 8. P. 690.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2021.690401>
- Kallenbach E.M.F., Friberg N., Lusher A. et al. 2022. Anthropogenically impacted lake catchments in Denmark reveal low microplastic pollution // *Environ. Sci. Pollut. Res.* V. 29. P. 47726.
<https://doi.org/10.1007/s11356-022-19001-8>
- Klimova Y.S., Chuiko G.M., Pesnya D.S. et al. 2020. Biomarkers of oxidative stress in freshwater bivalve mollusks (review) // *Inland Water Biol.* V. 13. № 4. P. 681.
<https://doi.org/10.1134/S1995082920060073>
- Li J., Liu H., Chen J.P. 2018. Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection // *Water Res.* V. 137. P. 362.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.056>
- Li L., Su L., Cai H. et al. 2019. The uptake of microfibers by freshwater Asian clams (*Corbicula fluminea*) varies based upon physicochemical properties // *Chemosphere.* V. 221. P. 107.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.024>
- Li J., Yang D., Li L. et al. 2015. Microplastics in commercial bivalves from China // *Environ. Pollut.* V. 207. P. 190.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2015.09.018>
- Lusher A.L., Welden N.A., Sobral P. et al. 2017. Sampling, isolating and identifying microplastics ingested by fish and invertebrates // *Anal. Methods.* V. 9. P. 1346.
<https://doi.org/10.1039/c6ay02415g>
- Magni S., Gagné F., André C. et al. 2018. Evaluation of uptake and chronic toxicity of virgin polystyrene microbeads in freshwater zebra mussel *Dreissena pol-*

- ymorpha* (Mollusca: Bivalvia) // Sci. Total Environ. V. 631–632. P. 778.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.075>
- Martyniuk V., Khoma V., Matskiv T. et al. 2022. Indication of the impact of environmental stress on the responses of the bivalve mollusk *Unio tumidus* to ibuprofen and microplastics based on biomarkers of reductive stress and apoptosis // Comp. Biochem. and Physiol. Part C. V. 261. P. 109.
<https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2022.109425>
- Masura J., Baker J., Foster G. et al. 2015. Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments // NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-48.
- McNeish R.E., Kim L.H., Barrett H.A. et al. 2018. Microplastic in riverine fish is linked to species traits // Sci. Rep. V. 8. P. 11639.
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-29980-9>
- Merzel R.L., Purser L., Soucy T.L. et al. 2020. Uptake and retention of nanoplastics in quagga mussels // Global Challenges. V. 4. P. 1800104.
<https://doi.org/10.1002/gch2.201800104>
- Moore C.J. 2008. Synthetic polymers in the marine environment: a rapidly increasing, long-term threat // Environ. Res. V. 108(2). P. 131.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2008.07.025>
- OECD Guidelines for the Testing of Chemicals – 218: Sediment–water Chironomid Toxicity Test Using Spiked Sediment. Organisation for Economic Cooperation and Development. 2004. France. Paris. P. 218.
- Parra S., Varandas S., Santos D. et al. 2021. Multi-biomarker responses of Asian clam *Corbicula fluminea* (Bivalvia, Corbiculidae) to cadmium and microplastics pollutants // Water. V. 13. P. 394.
<https://doi.org/10.3390/w13040394>
- Pastorino P., Prearo M., Anselmi S. et al. 2021. Use of the zebra mussel *Dreissena polymorpha* (Mollusca, Bivalvia) as a bioindicator of microplastics pollution in freshwater ecosystems: a case study from Lake Iseo (North Italy) // Water. V. 13. P. 434.
<https://doi.org/10.3390/w13040434>
- Patterson J., Jeyasanta K.I., Sathish N. et al. 2019. Profiling microplastics in the Indian edible oyster, *Magallana bilineata* collected from the Tuticorin coast, Gulf of Mannar, Southeastern India // Sci. Total Environ. V. 691. P. 727.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.063>
- Pedersen A.F., Gopalakrishnan K., Boegehold A.G. et al. 2020. Microplastic ingestion by quagga mussels, *Dreissena bugensis*, and its effects on physiological processes // Environ. Pollut. V. 260. P. 113964.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.113964>
- Petersen F., Hubbart J.A. 2020. The occurrence and transport of microplastics: the state of the science // Sci. Total Environ. V. 758. P. 143936.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143936>
- Plastics Europe. Plastics – The Facts 2021. Available online: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2021> (accessed on 10 February 2023).
- Rochman C.M., Parnis J.M., Browne M.A. et al. 2017. Direct and indirect effects of different types of microplastics on freshwater prey (*Corbicula fluminea*) and their predator (*Acipenser transmontanus*) // PLoS ONE. V. 12(11). e0187664.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187664>
- Sheehan D., Power A. 1999. Effects of seasonality on xenobiotic and antioxidant defence mechanism of bivalve molluscs // Comp. Biochem. and Physiol. V. 123. № 3. P. 193.
- Sighicelli M., Pietrelli L., Lecce F. et al. 2018. Microplastic pollution in the surface waters of Italian Subalpine Lakes // Environ. Pollut. V. 236. P. 645.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.02.008>
- Su L., Cai H., Kolandhasamy P. et al. 2018. Using the Asian clam as an indicator of microplastic pollution in freshwater ecosystems // Environ. Pollut. V. 234. P. 347.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.075>
- Su L., Xue Y., Li L. et al. 2016. Microplastics in Taihu Lake, China // Environ. Pollut. V. 216. September Pages 711–719.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.06.036>
- Sussarellu R., Suquet M., Thomas Y. et al. 2016. Oyster reproduction is affected by exposure to polystyrene microplastics // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. V. 113. P. 2430.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1519019113>
- Thiel M., Gutow L. 2005. The ecology of rafting in the marine environment. I. The floating substrata, Oceanography and Marine Biology: An Annual Review. V. 42. P. 181. <https://doi.org/10.1201/9780203507810.ch6>
- Van Cauwenberghe L., Devriese L., Galgani F. et al. 2015. Microplastics in sediments: a review of techniques, occurrence and effects. Particles in the Oceans: Implication for a safe marine environment // Mar. Environ. Res. V. 111. P. 5.
<https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2015.06.007>
- Van Cauwenberghe L., Janssen C.R. 2014. Microplastics in bivalves cultured for human consumption // Environ. Pollut. V. 193. P. 65.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2014.06.010>
- Van Cauwenberghe L., Vanreusel A., Mees J. et al. 2013. Microplastic pollution in deep-sea sediments // Environ. Pollut. V. 182. P. 495.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.08.013>
- Wagner M., Scherer C., Alvarez-Muñoz D. et al. 2014. Microplastics in freshwater ecosystems: what we know and what we need to know // Environ. Sci. Europe. V. 26(1). <https://doi.org/10.1186/s12302-014-0012-7>
- Walling D.E. 2009. The Impact of global change on erosion and sediment transport by rivers: current progress and future challenges. The United Nations World Water Development. Report 3. Water in a Changing World, International Sediment Initiative of UNESCO-IHP; UNESCO: Paris, France.
- Wardlaw C., Prosser R.S. 2020. Investigation of microplastics in freshwater mussels (*lasnigona costata*) from the Grand River Watershed in Ontario, Canada // Water, Air and Soil Pollut. V. 231. P. 405.
<https://doi.org/10.1007/s11270-020-04741-5>

- Weber A., Jeckel N., Wagner M. 2020. Combined effects of polystyrene microplastics and thermal stress on the freshwater mussel *Dreissena polymorpha* // Sci. Total Environ. V. 718. P. 137253.
https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137253
- Wright S.L., Thompson R.C., Galloway T.S. 2013. The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review // Environ. Pollut. V. 178. P. 48392.
https://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2013.02.031
- Xiong X., Zhang K., Chen X. et al. 2018. Sources and distribution of microplastics in China's largest inland lake-Qinghai Lake // Environ. Pollut. V. 235. P. 899906.
https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.12.081
- Zhang K., Gong W., Lv J. et al. 2015. Accumulation of floating microplastics behind the Three Gorges Dam // Environ. Pollut. V. 204. P. 117.
https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.04.023
- Zhang K., Shi H., Peng J. et al. 2018. Microplastic pollution in China's inland water systems: a review of findings, methods, characteristics, effects, and management // Sci. Total. Environ. V. 630. P. 1641.
https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.300
- Zhang H., Hong X., Yan S. et al. 2020. Environmentally relevant concentrations of bifenthrin induce changes in behaviour, biomarkers, histological characteristics, and the transcriptome in *Corbicula fluminea* // Sci. Total Environ. V. 728. P. 138821.
https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138821

Influence of Microplastics on Freshwater Bivalves (Review)

G. M. Chuiko^{1, *}, N. V. Kholmogorova^{2, 3}, G. P. Zharikov⁴

¹Papanin Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences,
Borok, Nekouzskii raion, Yaroslavl oblast, Russia

²Udmurt State University, Udmurt Republic, Izhevsk, Russia

³National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

⁴Yaroslavl State Medical University, Yaroslavl, Russia

*e-mail: gchuiko@ibiw.ru

Anthropogenic pollution of the aquatic environment with microplastics is one of the most urgent but least studied problems of modern ecotoxicology. The review, based on recent literature data, provides an analysis of studies in the field of absorption, bioaccumulation, and biological effects of microplastic exposure in freshwater bivalve molluscs (Bivalvia). A total of 22 studies have been conducted so far, which were performed on representatives of three families: Cyrenidae (45), Unionidae (25) and Dreissenidae (30%). The conducted studies are represented by field observations (43.5), field (8.7) and laboratory (47.8%) experiments. It has been shown that freshwater bivalves, as active filters, are able to absorb and accumulate in soft tissues (gills, hepatopancreas) microplastic particles from both water and bottom sediments, perceiving them as food objects. Bioaccumulation of microplastics in molluscs leads to functional and structural disorders in the body. The joint action of microplastics and other pollutants (cadmium, polychlorinated biphenyls, pharmacological drugs) can cause both synergistic and antagonistic effects in the biological responses of molluscs. Based on the conducted studies, it is suggested to use bivalve molluscs as organisms-bioindicators of freshwater pollution with microplastics.

Keywords: microplastics, surface fresh waters, bivalves, uptake, bioaccumulation, biological effects