УДК 574.522+574.64

[1]Э.И. Насырова, [1]О.В. Никитин, [1,2]В.З. Латыпова

[1]Казанский (Приволжский) федеральный университет, naselvira@mail.ru
[2]Институт проблем экологии и недропользования АН РТ

ПАРАМЕТРЫ ПЛАВАТЕЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ ДАФНИЙ КАК ИНДИКАТОРЫ ТОКСИЧНОСТИ СРЕДЫ

В статье приведен обзор научных публикаций о параметрах и паттернах плавательного поведения животных рода Daphnia, используемых в качестве индикаторов присутствия разнообразных органических и неорганических загрязняющих веществ в водной среде и представляющих интерес для экотоксикологии. Анализ выявил большой объем исследований, демонстрирующих многообразие чувствительных методов тестирования, основанных на оценке различных параметров плавательного поведения дафний.

Ключевые слова: дафнии; параметры плавания; поведенческая активность; токсичность; экотоксикология.

DOI: https://doi.org/10.24852/2411-7374.2024.1.67. 83

Введение

Более 100 лет дафнии вызывают интерес в качестве модельных организмов (Смирнов, 2016) и являются одной из наиболее часто используемых лабораторных культур в различных экотоксикологических экспериментах. На данный момент в литературе имеется обширная база исследований качества водной среды с использованием кладоцер. Для тестирований чаще всего применяют *D. magna* и *D. pulex*, реже другие виды. Помимо высокой чувствительности к наличию и появлению в водной среде различного рода сигналов, широкий интерес к рачкам как к тест-объектам также обусловлен рядом преимуществ: относительно простое культивирование, генетическая однородность особей одного поколения, плодовитость и короткий период созревания, достаточный уровень сложности и дифференцированности организма, удобные для наблюдения размер и прозрачность тела, разнообразные и несложные методики тестирования (Олькова, 2017).

Дафнии – род планктонных ветвистоусых ракообразных из отряда Anomopoda (Crustacea, Cladocera). Род включает в себя не менее 70 видов, ареал обитания которых широко распространен по всему миру (Котов, 2013). Рачков можно отнести к эврибионтным организмам, способным населять пресные водные объекты естественного и искусственного происхождения в различных широтах (Ивлева, 1969).

Особи имеют полупрозрачное тело овальной формы, слегка сжатое по бокам, длина которого может составлять до 6 мм (Ивлева, 1969; Котов, 2013; Smirnov, 2017). Тело сегментировано на голову и туловище. На голове расположены пять пар придатков: антенны I (антеннулы), антенны II, мандибулы, максиллулы и максиллы. Туловище защищает хитинизированный экзоскелет – карапакс, под которым расположены пять пар грудных конечностей.

Основным органом движения для плавания являются развитая пара вторых антенн, размещенная по бокам головы кладоцер (рис.). Сложная система мышц позволяет рачкам осуществлять плавательные движения посредством круговых взмахов антеннами. Плавание происходит прыжками, поддерживающими тело в воде. Это может быть серия из прыжков с приблизительно равной частотой, более линейным и плавным движением, либо несколько резких взмахов с переменным отдыхом (Fryer, 1991; Smirnov, 2017). Поведение рачков может изменяться в зависимости от различных эндогенных и экзогенных факторов, как например: возраст или размер особей (Dodson, 1991), хищничество (Lass, 2003), физико-химические параметры среды (Bandara, 2021).

Ранее большинство токсикологических тестов на кладоцерах было основано на оценке летальной (LC_{50}) или иммобилизирующей концентрации (EC_{50}) (Bownik, 2017). Однако, отсутствие летального или иммобилизирующего эффекта при оценке качества воды не всегда является свидетельством безопасности среды. В последние десятилетия в связи с возрастанием требований к обнаружению нетипичных загрязняющих веществ в воде, а также с развитием технических

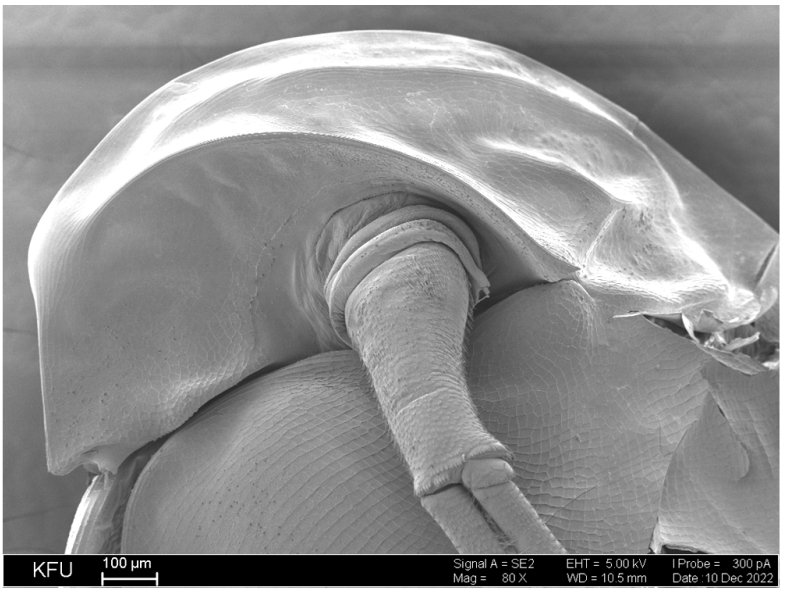

Рис. Изображение головы Daphnia magna с отходящими антеннулами и антеннами (сканирующая электронная микроскопия, Merlin, Carl Zeiss)
Fig. Head image of Daphnia magna with outgoing antennae and antennas (scanning electron microscopy, Merlin, Carl Zeiss)

возможностей наблюдения за тест-объектами появляется больше исследований, основанных на разных функциональных особенностях ветвистоусых: физиологических, биохимических, репродуктивных, морфологических, генетических и поведенческих. На сегодняшний день поведенческий отклик дафний на воздействие различных веществ, содержащихся в воде, является актуальным предметом изучения.

Параметры плавательного поведения дафний

Структура плавания дафний позволяет проводить анализ плавательного поведения посредством оценки различных параметров движения. В отсутствие каких-либо раздражающих факторов плавательное поведение кладоцер носит, как правило, случайный характер, как показано, например, в исследовании с применением особей *D. pulex* (Uttieri, 2004). Наличие различных стимулов в водной среде может провоцировать более детерминированное плавание.

В работах, посвященных анализу плавательного поведения дафний, встречается многообразие методов наблюдения за перемещением животных. Среди них можно выделить такие методы, как прямая визуальная оценка плавания (Olkova, 2020) или видеоряда (Bownik, 2017), подсчет на покадровых изображениях (Eghan, 2022) или автоматизированные методы анализа, в том числе с использованием компьютерного зрения (Wiklund, 2012; Nikitin, 2014).

В связи с необходимостью получения детальных сведений о сублетальных эффектах токсикантов в водных средах наблюдается существенный рост числа научных публикаций, посвященных плавательным поведенческим реакциям ракообразных в условиях воздействия внешних стрессоров. Ниже описаны различные исследования параметров и паттернов плавательного поведения животных рода *Daphnia,* которые рассматривались в качестве индикаторов токсичности водной среды.

Скорость плавания

Наиболее часто используемым параметром для анализа поведения дафний является скорость плавания. В большинстве исследований скорость рассматривается как скалярная величина, измеряемая в см/с, реже принципиальное значение имеет направление движения планктона. Скачкообразный, неравномерный характер плавания кладоцер обусловливает важность соблюдения единого метода наблюдения и частоты фиксирования перемещения рачков в серии тестирований, поскольку итоговая скорость будет выше с увеличением частоты измерений и наоборот (Dodson, 1991).

Влияние таких металлов, как кадмий (Wolf, 1998; Baillieul, 1999), медь (Untersteiner, 2003), цинк и хром (Nikitin, 2014; Nikitin, 2018) вызывало реакцию постепенного снижения скорости плавания рачков. В работе с применением карбарила животные увеличивали скорость при высоких концентрациях инсектицида, либо при очень длительном воздействии (Dodson, 1995). Схожим образом действовало добавление в среду эсфенвалерата (Nikitin, 2014). После интоксикации параоксон-метилом, при котором произошло возрастание скорости, исследуемых особей переместили в чистую среду, где они постепенно начали восстанавливать скорость до контрольных значений (Duquesne, 2010). Применение инсектицида лямбда-цигалотрина (Bownik, 2019c) вызывало угнетение скорости плавания организмов. Воздействие такими веществами, как аммоний, нитриты и фосфаты провоцировало дозозависимое снижение скорости, в то время как нитраты каких-либо изменений поведения не вызвали (Serra, 2019). Значительных изменений скорости плавания рачков выявлено не было под влиянием натуральных и синтетических красителей (Abe, 2019), а также животноводческих стоков (Ayodeji, 2021).

Скорость плавания также анализировалась

в вертикальной (пробирках) и горизонтальной (в лунках) проекциях с добавлением пестицидов хлорпирифоса, тербутилазина и их смеси (Vera-Herrera, 2022). Химикаты стимулировали увеличение средней скорости плавания в обоих проекциях, при этом более резкие изменения наблюдались при горизонтальном плавании, а также при высоких концентрациях смеси веществ. В другом эксперименте комбинация полихлорированного бифенила и трибутилоловохлорида вызвала угнетение плавательной активности и так же оказала больший эффект, чем данные загрязнители по отдельности (Schmidt, 2005).

Биодоступность УФ-фильтра бензофенона-3 (Yang, 2021) анализировалась в условиях добавления в воду взвешенных органических и неорганических веществ. Скорость дафний снижалась в присутствии бензофенона-3. Добавление в воду взвешенных частиц усиливало действие токсиканта.

В качестве стрессоров рассматривались такие фармакологические препараты, как агонист дофамина апоморфин (Bownik, 2018), транквилизатор гидроксизин (Садыкова, 2022) и химиотерапевтический препарат цисплатин (Bownik, 2020), которые вызвали снижение скорости дафний.

Значимое воздействие оказывали анестетики лидокаин, вызвавший повышение скорости плавания, тетракаин, иммобилизовавший ракообразных, а также смесь данных препаратов, которая смягчила их разнонаправленное влияние, за исключением высокой концентрации, при которой особи утратили активность (Robledo-Sánchez, 2019). В биотестах с применением искусственного подсластителя сукралозы (Wiklund, 2012) было обнаружено увеличение средней скорости дафний.

Некоторые вещества могут вызывать временный эффект на плавательное поведение, как, например, летучие органические соединения 2,4,7-декатриенал и β-циклоцитрал, выделяемые водорослями (Watson, 2007; Jüttner, 2010). Ракообразные увеличивали скорость сразу после добавления веществ в водную среду, однако через короткое время возвращались к нормальным значениям, что может свидетельствовать об адаптационных возможностях рачков относительно некоторых соединений.

Скачкообразное снижение скорости наблюдалось при добавлении в воду анатоксина-a – цианотоксина, выделяемого несколькими видами цианобактерий (Bownik, 2019a). В качестве стрессоров были рассмотрены также три различных цианотоксина: микроцистин-LF, микроцистин-LR, анабенопептин-B, а также смесь двух последних (Pawlik-Skowrońska, 2021). Более резкое и интенсивное снижение скорости плавания наблюдалось при наличии в воде комбинации двух типов цианотоксинов. В другом исследовании влияние микроцистина-LR в краткосрочном эксперименте, напротив, повышало скорость плавания (Nikitin, 2014).

В ряде исследований с применением различного рода наночастиц (фуллерены (Brausch, 2011), диоксид титана (Noss, 2013), диоксид церия (Artells, 2013), углеродные нанотрубки (Stanley, 2015), графен и оксид графена (Cano, 2017)) было выявлено угнетение плавательной активности дафний. Наночастицы диоксида церия не вызвали изменений, однако частицы, покрытые полисахаридом хитозаном, стимулировали скорость, что говорит о влиянии модификации частиц на уровень биодоступности (Villa, 2020).

В работах с использованием микроразмерного полистирола было обнаружено как увеличение (De Felice, 2019), так и снижение скорости плавания рачков (Никитин, 2022; Magester, 2021). Применение нано- и микрочастиц полистирола в исследованиях предоставляет разные результаты, причиной которых может служить различия типов полистирола, диаметров и концентраций частиц, условий проведения тестирования и другие параметры.

В серии исследований наблюдалось влияние токсикантов в сочетании с эктоином – веществом, вырабатываемым некоторыми видами бактерий и выполняющим функцию протектора при осмотическом стрессе. Использование перекиси водорода (Bownik, 2015c) и формальдегида (Bownik, 2015a) в качестве экспериментальных загрязнителей привело к снижению скорости *D. magna*. У особей, подвергшихся воздействию выбранных веществ в комбинации с осмопротектором, наблюдалось менее интенсивное снижение скорости плавания, что может свидетельствовать о его защитном для кладоцер потенциале. Стоит отметить, что работа по изучению самостоятельного эффекта эктоина выявила его угнетающий на скорость дафний эффект (Bownik, 2015b). Воздействие органического растворителя диметилсульфоксида также вызывало угнетение скорости животных, однако в данном случае использование эктоина совместно с токсикантом не только не оказывало смягчающего эффекта, но и привело к подавлению скорости рачков по мере увеличения концентрации осмопротектора (Bownik, 2019b).

Ускорение движения

В некоторых экотоксикологических исследованиях в качестве самостоятельного параметра оценки плавательного поведения дафний рассма-

тривается ускорение движения. Данный параметр является векторной величиной, выраженной в см/с^2 и позволяющей количественно определить изменение скорости плавания организма в единицу времени. Например, угнетение плавания *D. magna* при воздействии растворителя диметилсульфоксида было продемонстрировано путём анализа только одного параметра – ускорения (Huang, 2018).

В большинстве работ с наблюдением и ускорения, и скорости плавания изменения параметров происходили однонаправленно. Так, например, применение наночастиц полистирола (Lin, 2019), органических загрязнителей (Liu, 2020; Yang, 2021), гербицида глифосата (Hansen, 2016), а также воды из ручья с высокой антропогенной нагрузкой (Chatterjee, 2019) вызвало снижение скорости и ускорения животных относительно контроля. Несколько различных пестицидов (Vera-Herrera, 2022) и модифицированные наночастицы диоксида церия (Villa, 2020), напротив, способствовали увеличению значений обоих поведенческих параметров. Поскольку ускорение и скорость связанные, но не зависящие друг от друга физические величины, в некоторых случаях они способны изменяться разнонаправленно. Воздействие разных изомеров бромированного антипирена увеличило ускорение планктона, в то время как увеличение скорости было обнаружено в присутствии только одного из изомеров (Seyoum, 2021).

Проплываемое расстояние

При тестировании кладоцеры проплывают расстояние, значение которого может являться показателем состояния организма и чувствительным индикатором качества водной среды. Эксперименты с использованием таких органических и неорганических токсикантов как хлорид меди, бихромат калия, кофеин, этанол и диметилсульфоксид показали сокращение расстояния, пройденного рачками, как с течением времени, так и с увеличением концентрации (Huang, 2017). Сокращение дистанции плавания дафний было выявлено при использовании гербицида глифосата, а также его смеси с медью (Hansen, 2016).

Анализ взаимодействия с инсектицидами хлорпирифосом и хлорпирифос-метилом показал снижение скорости плавания после первого дня экспозиции и возрастание после двух суток (Di Nica, 2022). Авторы указали, что это вероятно связано с активацией компенсаторных механизмов в критических условиях.

В качестве стрессоров также был использован ряд различных пестицидов, влияние которых анализировалось с чередованием темного и светового периодов экспозиции (Hussain, 2020). В условиях отсутствия света при взаимодействии с большинством химикатов дафнии существенно сократили пройденное расстояние. Однако при достаточной освещенности несколько токсикантов вызывали увеличение дистанции плавания относительно контроля. Результаты показали, что один токсикант способен спровоцировать противоположные реакции у зоопланктона при разных условиях освещения.

Применение в тестированиях препарата цисплатина спровоцировало сокращение пройденного животными в процессе экспозиции расстояния (Bownik, 2020). Влияния антибиотика ципрофлоксацина на плавание было обнаружено только в условиях темноты и только при некоторых концентрациях (Dionísio, 2020). Разные, в том числе противоположные, реакции в поведении вызвали восемнадцать нейроактивных соединений, включающие инсектициды и фармакологические препараты (например, пилокарпин, флуоксетин, циметидин), которые воздействуют на разные типы медиаторных систем (Bellot, 2021). В другом исследовании были получены сведения о снижении дистанции плавания под влиянием препаратов – агонистов дофаминовых рецепторов (Barrozo, 2015).

Органический загрязнитель бисфенол F индуцировал снижение пройденного пути при более высоких дозах (Liu, 2020), а один из изомеров бромированного антипирена, напротив, увеличил активность плавания (Seyoum, 2021).

Воздействие очищенных сточных вод от объектов туристической инфраструктуры привело к аномальной реакции животных (Villa, 2018). Она выражалась в резком изменении значений параметров плавания при меньшем содержании рассматриваемых вод в тестируемой среде и отсутствии существенного влияния на поведение при высокой концентрации.

Сообщалось о снижении пройденного дафниями расстояния в присутствии обычных наночастиц полистирола и частиц, покрытых отрицательно заряженными аминами (Lin, 2019). Было обнаружено, что в процессе экспонирования две другие модификации нанопластика – функционализированные карбоксилом и положительно заряженными аминогруппами – образовывали агрегации, что, по всей вероятности, послужило причиной уменьшения проникающей способности и снижения токсичности. В другом исследовании анализировалось изменение биодоступности наночастиц полистирола после обработки ультразвуком (Vaz, 2021). Несмотря на то, что эксперимент указал на резкое снижение острой токсичности нанопластика после ультразвуково-

го воздействия, итоговая дистанция плавания животных в присутствии обработанного полистирола оказалась короче, чем характерная для частиц без обработки.

Продолжительность плавания

В условиях сильного стресса дафнии способны проявлять реакцию кратковременной иммобилизации. В качестве биомаркера в этом случае могут приниматься значения общего времени активного плавания за время экспозиции (Ferrão-Filho, 2014) либо соотношение периода активного плавания к неактивному (Untersteiner, 2003). Например, время активного плавания рачков сокращалось в присутствии в водной среде меди (Untersteiner, 2003), инсектицида хлорпирифоса (Ferrario, 2018) и наночастиц полистирола (Lin, 2019). Препараты для лечения сердечно-сосудистых заболеваний пропранолол и антидепрессант флуоксетин нарушили плавательную активность только при очень высоких концентрациях (Nielsen, 2018). Снижение времени плавания дафний отмечалось в опытах по воздействию гербицида глифосата, меди, а также их смеси (Hansen, 2016). Стоит отметить, что комплекс глифосата и меди оказался более опасным для дафний, чем глифосат, но менее токсичным, чем одиночная нагрузка медью.

Два вида *D. magna* и *D. longispina* сравнивали под влиянием пиритиона цинка (Sousa, 2020). Измерения проводились с использованием двух возрастных групп. Новорожденные особи обоих видов существенно не изменили своего поведения в состоянии интоксикации биоцидом. Шестидневные особи *D. magna* показали дозозависимое снижение времени плавания, а шестидневные рачки *D. longispina* стали плавать меньше только при низких дозах. Таким образом одни и те же вещества способны вызывать непохожие поведенческие реакции у близких видов и у разных возрастных групп рода *Daphnia*.

Метаболит психоактивных веществ бензоилэкгонин спровоцировал снижение времени активного плавания животных при более высокой концентрации, но при этом увеличивал среднюю скорость (Parolini, 2018). Такой результат является неожиданным, поскольку скорость и время плавания, как правило, коррелируют между собой. Авторами сообщается, что это может происходить из-за специфики механизма действия вещества, провоцирующего высокоскоростные отрывистые движения.

В среды обитания *D. pulex* и *D. similis* добавлялись штаммы цианобактерий *Cylindrospermopsis raciborskii*, продуцирующих сакситоксины, а также порции необработанной воды из эвтрофного водоема, содержавшей виды из рода *Microcystis* (Ferrão-Filho, 2014). Особи *D. pulex* оказались менее устойчивы к токсинам и были иммобилизованы при высоком содержании цианобактерий. Рачки *D. similis* резко снизили свою активность в начале экспозиции, но затем постепенно восстановили уровень активности до контрольных значений.

Корреляции между поведенческими реакциями на стресс у одного организма не было обнаружено в эксперименте с использованием очищенных сточных вод, источником которых являлась зона туристического проживания (Villa, 2018). Закономерность в реакциях дафний на загрязнитель отсутствовала, значения параметра плавания оказались разнонаправленными при разных концентрациях и времени тестирования.

Сообщалось об измерении соотношения времени вертикального и горизонтального профилей плавания дафний под влиянием антибиотика норфлоксацина, которое осуществлялось посредством трехмерного наблюдения за перемещением животных (Pan, 2017). Время горизонтального плавания уменьшилось в присутствии токсиканта, при этом вертикальное перемещение осталось на том же уровне. Вертикальный и горизонтальный профили плавания требуют разный объем физических ресурсов, а изменение их соотношения может указывать на нарушение механизмов контроля оптимальной стратегии плавательного поведения (Bownik, 2017). Используя также соотношения значений других различных параметров плавания, можно получать дополнительные сведения о состоянии кладоцер.

Двигательная активность

В качестве индикаторов токсичности некоторыми авторами рассматривается общая оценка двигательной активности дафний или интенсивность плавания, для анализа которой могут использоваться различные экспериментальные системы.

В серии исследований с добавлением разного рода агрохимикатов, как например: малатион, паратион, дельтаметрин, дихлофос, был предложен параметр плавания – сила поведения (Ren, 2009, 2017). Аналитический принцип заключался в отслеживании сигнала переменного тока в тестовой камере, передаваемого системе при перемещении дафнии, обозначаемым как 1 – существенная активность, 0 – нет активности. Поведенческая сила в условиях интоксикации большинством ксенобиотиков оказалась ниже, чем в контроле.

Другими авторами был осуществлен ряд исследований с применением метода визуального анализа плавательной активности кладоцер. В

качестве тест-реакции учитывалось количество пересечений организмами условно обозначенной линии экспериментального поля в течение пяти минут. Токсическая нагрузка производилось тяжелыми и редкоземельными металлами (Olkova, 2022), водной вытяжкой из поливинилхлорида (Будина, 2017) и загрязненных почв (Олькова, 2022), а также пробами воды из поверхностных источников вблизи объектов техногенного воздействия (Olkova, 2020). Результаты показали дозозависимое снижение значений параметра плавания.

В качестве еще одного способа анализа плавательного поведения дафний была предложена оценка количества «импульсных движений» (Hussain, 2020). За импульсные движения принимали резкие движения со скоростью более 20 пикселей в секунду. Большинство из 12 различных пестицидов, использованных в работе, вызвали сокращение количества импульсных движений планктона.

Частота прыжков

Плавание дафний состоит из коротких прыжков, совершаемых взмахом второй пары антенн (Fryer, 1991). Отдельные прыжки можно определить как опускание вторых антенн ниже уровня головы с последующим возвращением к исходной позиции (Lovern, 2007). Наблюдения за частотой прыжков планктона с добавлением фармакологических препаратов (Bownik, 2020), а также цианотоксинов (Pawlik-Skowrońska, 2021) выявили уменьшение частоты прыжков кладоцер относительно контрольных испытаний. Растворитель диметилсульфоксид также вызвал снижение количества прыжков рачков, в то же время его совместное воздействие с осмопротектором эктоином ослабило снижение частоты прыжков при тех же концентрациях токсиканта (Bownik, 2019b). Совместное использование веществ в этих же испытаниях усиливало снижение скорости плавания животных, тем самым можно было наблюдать разнонаправленные эффекты у двух поведенческих параметров.

Использование наноразмерного фуллерена и его производных в качестве стрессоров спровоцировало увеличение частоты прыжков, при этом применение диоксида титана в этой же работе значимых изменений не вызвало (Lovern, 2007). В другой работе анализ применения фуллеренов, отличающийся от предыдущего исследования более длительным периодом экспозиции, выявил резкое учащение прыжков в первые часы тестирования и последующее снижение значения параметра с течением времени (Wang, 2019). Полученные сведения позволяют сделать вывод о потенциальной зависимости прыгательной активности зоопланктона от длительности воздействия фуллеренов.

Вертикальное распределение

Одними из наиболее ранних вариантов исследований плавательного поведения кладоцер являлись исследования особенностей вертикальной миграции. Некоторыми авторами было отмечено наличие у дафний циркадных ритмов (Bandara, 2021) – в обычных условиях рачки демонстрируют суточную вертикальную миграцию, характеризующуюся дневным погружением в более глубокие воды и ночным всплытием в приповерхностный слой. Однако проявления обратной суточной миграции (всплытие днём и погружение ночью), которые авторы связывают с присутствием хищников, доступностью пищи или физико-химическими показателями водной среды, сделали вопрос о порядке значимости факторов предметом дискуссии (Bandara, 2021). Кроме того, к факторам, определяющим особенности вертикальной миграции, можно отнести гравитаксис – влияние силы гравитации на поведение свободноплавающих организмов, поскольку он также является одним из средств ориентации в толще воды (Bownik, 2017).

В экспериментах с кадмием происходил подсчет ракообразных, плавающих в верхней или нижней половинах кюветы (Wolf, 1998). Интоксикация металлом увеличила долю планктона, плавающего в нижней части кюветы. Инсектицид эндосульфан и бихромат калия (Gutierrez, 2012) значительно изменили паттерн суточной миграции дафнии относительно контроля. Нарушение вертикальной миграции было обнаружено также при добавлении в среду цианобактерий *Microcystis aeruginosa* (Berthon, 1995). Стоит отметить, что оказывать влияние способны были только цианобактерии в фазе погибания, в то время как в стадии роста реакция на них была незначительна.

Под воздействием органических загрязнителей полихлорированного бифенила и трибутилоловохлорида, а также комбинации этих веществ, оказавшей наибольший эффект, дафнии аномально увеличивали высоту плавания в середине многодневной экспозиции и погружались на дно к концу эксперимента (Schmidt, 2005). Биогенные летучие органические соединения также вызвали снижение высоты плавания (Watson, 2007). Противоположную реакцию показали животные в контакте с подсластителем сукралозой (Wiklund, 2012) и микроразмерным полистиролом, при котором высота плавания значительно увеличилась (Magester, 2021).

В литературе встречаются различные названия данного параметра: вертикальное распределение,

вертикальная миграция, высота плавания, глубина плавания, подразумевающие под собой одну и ту же характеристику поведения, но имеющие разный дизайн тестирования.

Фототаксис

Свет является одним из факторов, способных влиять на паттерны поведения дафний. Фототаксис – явление направленного движения организмов в ответ на воздействие света или изменение его интенсивности. Как было указано выше, для кладоцер характерно перемещение в более глубокие слои воды при дневном свете и в приповерхностные при недостаточном освещении, другими словами, проявление отрицательного фототаксиса. Однако возможна положительная реакция на свет или её отсутствие при изменении привычных условий, как, например, продолжительный недостаток освещения или кислорода, состояние голода (Smirnov, 2017). Также существует зависимость от спектрального состава света (Storz, 1998). Сложности исследования фототаксического поведения связанны с необходимостью создания нетиповых условий тестирования для воспроизведения градиентности условий среды (Ringelberg, 1999).

Изменение фотомоторного поведения в присутствии нитрата таллия было рассмотрено в тестовых системах для двух возрастных категорий дафний (Nagel, 2022). Токсикант увеличил отклик на световое воздействие у взрослых животных, не получавших питание, тогда как плавательные показатели других особей от контрольных уровней отличались незначительно.

Горизонтальное распределение животных в экспериментальной камере, разделенной на секторы с разным уровнем освещенности, изменилось при использовании инсектицида линдана таким образом, что расположение особей стало более случайным и независимым (Goodrich, 1990).

Также рассматривалась нагрузка семнадцатью нейроактивными соединениями, влияющих на различные нейромедиаторные системы (Bedrossiantz, 2020). В работе анализировалась пройденная животными дистанция за каждый период интенсивного освещения. Инсектицид имидаклоприд, фармакологические препараты апоморфин, дифенгидрамин, диазепам и мемантин ослабили фототактическую реакцию организмов, все другие токсиканты увеличили эффект.

Взаимодействие планктона с четырьмя типами нейроактивных препаратов на время, проведенное в нижней части кюветы, было рассмотрено при трёх типах освещенности (Simão, 2019). В условиях интенсивного света значительных отличий от контрольных испытаний обнаружено не было. При средней степени освещенности, а также в темноте такие вещества как карбамазепин, пропранолол и флуоксетин способствовали увеличение проведенного на глубине времени. В другом исследовании препарат карбамазепин также способствовал ослаблению фототаксической реакции организма (Nkoom, 2019).

Влияние содержания минеральной взвеси в воде на биодоступность препарата циталопрама анализировалось посредством оценки фотомоторных реакций, выраженных в изменении темпов перемещения особей навстречу источнику света (Yang, 2022). Было обнаружено снижение уровня положительного фототаксического поведения при воздействии препарата, а также полученного эффекта при добавлении взвешенных частиц.

Изменение фототаксиса *D. magna* в пробирке с поверхностным освещением рассматривалось под влиянием простых и модифицированных карбоновой кислотой фуллеренов (Brausch, 2011). Применение обоих типов фуллеренов вызвало более низкое плавание животных относительно контроля. Использование микроразмерного полистирола привело к получению неоднозначных результатов фототаксического поведения: особи перемещались навстречу источнику света (вертикально вверх) более медленно относительно контроля в присутствии частиц микропластика размера 1 мкм и быстрее при более крупных частицах размера 10 мкм (De Felice, 2019).

Роение

Наличие в среде обитания некоторых внешних сигналов может вызывать коллективные поведенческие реакции, при которых множество особей движутся в одном направлении и образуют плотное скопление – рой (Pijanowska, 1997). При этом дафнии не являются социальными животными (Garcia, 2007). Эндогенные процессы, вызывающие роение кладоцер, пока недостаточно изучены. В существующих публикациях для анализа роения используются средняя дистанция между планктоном, расстояние до стенок сосуда либо визуальная оценка.

После добавления в водную среду наночастиц диоксида титана область плавания ракообразных сместилась к центру используемой емкости, демонстрируя роевое поведение (Noss, 2013). В другом исследовании с чередованием условий отсутствия света, слабой и сильной освещенности в качестве стрессоров были использованы несколько нейроактивных препаратов (Simão, 2019). В темный период экспозиции и при слабом освещении отравленные рачки, как правило, сокращали расстояние между собой. Агрегирование в условиях интенсивного освещения, напро-

тив, оказалось слабее контрольных уровней. Примечательно, что в контрольных условиях дафнии показали светозависимое увеличение дистанции между особями. Также роевое поведение животных анализировалось в присутствии органического загрязнителя акриламида (Eghan, 2022). Результаты показали увеличение дистанции между животными, при этом измерение других параметров плавания в данном эксперименте каких-либо существенных изменений не выявило.

Пространственное распределение

В нормальных условиях ветвистоусые ракообразные стремятся к равномерному перемещению в выделенном пространстве. Некоторыми авторами плавательное поведение кладоцер описывается как пример моделей физической диффузии (Erdmann, 2004; Garcia, 2007). Для имитации диффузионного движения рачков был проведен эксперимент с высвобождением из точки агрегации в центре пластикового контейнера пятидесяти особей, позволивший подсчитать коэффициент диффузии перемещения ансамбля дафний (Nasyrova, 2020).

Другими авторами предлагался такой параметр как плотность перемещения животных. При помощи программных средств обработки изображений вычислялось соотношение «следа», оставленного зоопланктоном в течение испытания, ко всей площади доступной для плавания. Анализ воздействия анальгетика (Bownik, 2018) и инсектицида (Bownik, 2019c) показал, что в присутствии токсикантов произошло уменьшение площади плавания дафний, при этом данный параметр показал чувствительность даже при низких концентрациях.

Оценка параметра также может производится при помощи визуального анализа трека плавания. Под воздействием инсектицида ацетамиприда рачки показали неравномерную траекторию плавания, предпочитая чаще участки возле стенок сосуда, тогда как плавание в контроле было равномерным и заняло почти весь объем наблюдаемой области (Bownik, 2017). Можно предположить, что перемещение в сторону стенок сосуда является проявлением защитного поведения, однако в работах, указанных в разделе о роевом поведении дафний, напротив, была выявлена реакция роения в центре емкости в ответ на наличие стрессоров (Noss, 2013; Simão, 2019).

Пространственное избегание

Большинство поведенческих тестов с дафниями основано на воздействии однородной концентрации токсиканта в среде. Однако, кладоцеры способны реагировать на локальное присутствие в воде сублетальных доз токсикантов посредством поведения избегания или активной миграции в более чистые участки. Анализ такого поведения требует создания нетипичных способов проведения тестирования. Оценка влияния меди проводилась в пятикамерном планшете с градиентным содержанием токсиканта и возможностью свободного перемещения животных (Lopes, 2004). Результаты показали избегание рачками камер с высоким содержанием меди. Похожие исследования продемонстрировали избегание отсеков с более высоким содержанием сточных вод целлюлозного производства (Rosa, 2008) и гербицида атразина (Rosa, 2012). В другой работе были использованы вертикальные трубки, разделенные на нижний и верхний слои с разными температурой и количеством пищи, имитирующих условия эпилимниона и гиполимниона, которые содержали разное количество цианобактерий *Microcystis aeruginosa* (Haney, 2013). Поведенческому анализу подверглись три вида дафний из разных мест обитания: *D. carinata* проявили выраженное избегание *M. aeruginosa*, в то время как особи *D. galeata* и *D. pulex* не изменили глубину плавания после добавления цианобактерий. В качестве стрессоров также применялись различные концентрации хлорпирифоса, тербутилазина и их смеси, содержащиеся в отдельных камерах (Vera-Herrera, 2022). Животные равномерно распределились в камерах с одиночными токсикантами, однако в случае с комбинированным воздействием большинство ракообразных в конце экспозиции находились в камерах с чистой водой либо с невысокой дозой вещества. Еще один способ проведения тестирования предполагал постепенное точечное добавление перекиси водорода через трубку в резервуар с водой, в результате чего по мере увеличения концентрации токсиканта дафнии удалялись от источника (Grant, 2015).

Фрактальная размерность

В зависимости от выбранных временны́х и пространственных масштабов анализа параметров плавания дафний, особи могут демонстрировать как более прямолинейную траекторию движения, так и достаточно сложную и извилистую. Одним из методов оценки траектории плавания планктона является определение её фрактальной размерности. Фракталы – это геометрические компоненты объекта, повторяющиеся при разных масштабах. Фрактальная размерность позволяет количественно измерить сложность и детализацию геометрических паттернов, а химические стимулы в водной среде способны изменить траекторию плавания организма (Shimizu, 2002; Nikitin, 2015). Увеличение значения размерности наблюдалось под воздействием таких токсикан-

тов, как сульфат меди, инсектицидов дихлофоса, пропоксура (Shimizu, 2002) и эсфенвалерата (Nikitin, 2015). Влияние некоторых органических соединений, напротив, вызвало уменьшение фрактальной размерности траектории плавания (Watson, 2007; Liu, 2018).

Углы поворотов

Плавание кладоцер имеет преимущественно извилистый характер, в том числе в нормальном состоянии, с часто меняющимся направлением движения (Fryer, 1991). Величины углов поворотов при движении используются как еще один параметр оценки поведенческой реакции животных на внешние стрессоры, измеряются в градусах, либо в радианах и могут быть применены к горизонтальному и вертикальному профилю плавания. В исследованиях встречается несколько интерпретаций данного параметра.

Сообщалось о наблюдении за дафниями, подвергшимся отравлению пестицидом диазиноном и органическим загрязнителем 4-нонилфенолом (Zein, 2015). Для анализа плавательного поведения использовались углы поворотов между соседними кадрами видеозаписи, которые усреднялись для каждых 5-и секунд тестирования. Токсиканты способствовали дозозависимому увеличению значения параметра. Примечательно, что при высоких концентрациях данных веществ увеличению среднего угла поворота сопутствовало снижение дистанции плавания особей, что может говорить о потери контроля движения организма. Аналогичным образом замерялись углы с использованием девяти различных веществ, влияющих на эндокринную систему (Alla, 2021). Изменения значений данного параметра плавания вызвали токсиканты 4-нонилфенол, хлорпирифос, увеличившие средние углы поворотов, и триклозан, средние концентрации которого спровоцировали уменьшение углов.

В других исследованиях с использованием трехмерной системы наблюдения в качестве стрессоров в среду добавляли карбарил (Dodson, 1995), обычные и модифицированные карбоновой кислотой фуллерены (Brausch, 2011). Повороты в этих экспериментах оценивались при помощи шести параметров для каждых пяти секунд экспозиции: чистый угол изменения направления, средние углы поворота, извилистость или дисперсия углов, модальные углы по направлению вверх и вниз, коэффициент кривизны, рассчитываемый как соотношение чистого угла к пройденному расстоянию. Существенных изменений значений под влиянием данных веществ обнаружено не было.

Апоморфин (Bownik, 2018) и лямбда-цигалотрин (Bownik, 2019c) вызвали снижение значений параметра, который определялся как угол изменения направления движения в течение каждой минуты испытания. В исследовании с апоморфином был применен еще один параметр оценки плавательного поведения – количество поворотов с углом более 20°, также снижавшийся с увеличением содержания вещества в воде. Также влияние микроцистинов на плавательное поведение рассматривалось посредством анализа гистограммы частот углов поворотов дафний в процессе экспозиции (Никитин, 2018).

Вращение

Бóльшую часть времени дафнии плавают в положении небольшого наклона вперед верхней частью тела (Fryer, 1991). Вращение вокруг своей оси может являться признаком состояния стресса, дезориентации и потери контроля движения (Bownik, 2017).

Аномальные вращательные движения наблюдались у рачков, подвергнутых влиянию карбарила (Dodson, 1995). Такое же поведение было выявлено в первые 10 секунд добавления анатоксина-а, после чего количество вращений начало постепенно снижаться и прекратилось к концу испытания (Bownik, 2019a). Получение такого рода результатов может свидетельствовать о высокой проницаемости токсиканта. Аналогичное поведение было зафиксировано при тестировании антигистаминного препарата ципрогептадина, но в данном случае вращательные движения появились вследствие длительной экспозиции (Jeong, 2018).

Заключение

Таким образом, существенный объем научных публикаций, посвященных экотоксикологическому анализу параметров плавательного поведения дафний, включает в себя большое количество самых разнообразных тест-реакций. Вместе с тем высокая вариативность алгоритмов проведения анализа накладывает определенные ограничения для их широкого применения в данный момент времени. Можно ожидать, что в последующем увеличение количества опробований уже существующих методов тестирования поможет стандартизировать результаты экспериментальных данных для обеспечения их надежного использования. Тем не менее наличие множества чувствительных подходов в исследовании поведенческих паттернов для широкого диапазона веществ подчеркивает значительные перспективы их дальнейшего применения на практике в качестве индикаторов токсичности среды.

Список литературы

1. Будина Д.В., Ашихмина Т.Я., Олькова А.С. Исследование токсических эффектов водных вытяжек из ПВХ пластикатов // Бутлеровские сообщения. 2017. Т. 50, №6. С. 112–118. doi: 10.37952/roi-jbc-01/17-50-6-112.

2. Ивлева И.В. Биологические основы и методы массового культивирования кормовых беспозвоночных. М.: Наука, 1969. 171 с.

3. Котов А.А. Морфология и филогения Anomopoda (Crustacea: Cladocera). М.: КМК Scientific Press Ltd., 2013. 638 с.

4. Никитин О.В., Насырова Э.И. Влияние микроцистинов на поведенческую активность дафний // Экологические проблемы бассейнов крупных рек. Тольятти: Анна, 2018. С. 230–232. doi: 10.24411/9999-002A-2018-10099.

5. Никитин О.В., Насырова Э.И., Кузьмин Р.С., Миннегулова Л.М., Латыпова В.З., Ашихмина Т.Я. Влияние частиц микропластика полистирола на морфологические и функциональные показатели Daphnia magna // Теоретическая и прикладная экология. 2022. №4. С. 196–203. doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-196-203.

6. Олькова А.С. Условия культивирования и многообразие тест-функций Daphnia magna Straus при биотестировании // Вода и экология: проблемы и решения. 2017. №1. С. 63–82. doi: 10.23968/2305-3488.2017.19.1.63-82.

7. Олькова А.С. Технология снижения токсичности почвы, загрязненной бензином, с помощью торфа и торфогеля // Экология и промышленность России. 2022. Т. 26, №9. С. 54–59. doi: 10.18412/1816-0395-2022-9-54-59.

8. Садыкова К.Н., Насырова Э.И., Никитин О.В. Влияние фармацевтического препарата гидроксизина на двигательную активность *Daphnia magna* // Молодежные исследования сегодня. Петрозаводск: Новая Наука, 2022. С. 182–186.

9. Смирнов Н.Н. Современное состояние и перспективы исследований физиологии ветвистоусых ракообразных (Cladocera, Crustacea) // Зоологический журнал. 2016. Т. 95, №7. С. 788–804. doi: 10.7868/S0044513416070102.

10. Abe F.R., Machado A.L., Soares A.M.V.M., de Oliveira D.P., Pestana J.L.T. Life history and behavior effects of synthetic and natural dyes on *Daphnia magna* // Chemosphere. 2019. Vol. 236. 124390. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124390.

11. Alla L.N.R., Monshi M., Siddiqua Z., Shields J., Alame K., Wahls A., Akemann C., Meyer D., Crofts E.J., Saad F., El-Nachef J., Antoon M., Nakhle R., Hijazi N., Hamid M., Gurdziel K., McElmurry S.P., Kashian D.R., Baker T.R., Pitts D.K. Detection of endocrine disrupting chemicals in *Danio rerio* and *Daphnia pulex*: Step-one behavioral screen // Chemosphere. 2021. Vol. 271. 129442. doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.129442.

12. Artells E., Issartel J., Auffan M., Borschneck D., Thill A., Tella M., Brousset L., Rose J., Bottero J.Y., Thiéry A. Exposure to cerium dioxide nanoparticles differently affect swimming performance and survival in two Daphnid species // PLoS ONE. 2013. Vol. 8. e71260. doi:10.1371/journal.pone.0071260.

13. Ayodeji O.J., Awoyemi O.M. Beef cattle feedlot surface water containing multi-class agrochemicals elicits physiological and behavioral responses among *Daphnia pulex* // Environmental monitoring and assessment. 2021. Vol. 193. P. 1–15. doi: 10.1007/s10661-021-09181-0.

14. Baillieul M., Blust R. Analysis of the swimming velocity of Cd-stressed *Daphnia magna* // Aquatic toxicology. 1999. Vol. 44. P. 245–254. doi: 10.1016/s0166-445x(98)00080-0.

15. Bandara K., Varpe Ø., Wijewardene L., Tverberg V., Eiane K. Two hundred years of zooplankton vertical migration research // Biological reviews of the Cambridge philosophical society. 2021. Vol. 96. P. 1547–1589. doi: 10.1111/brv.12715.

16. Barrozo E.R., Fowler D.A., Beckman M.L. Exposure to D2-like dopamine receptor agonists inhibits swimming in *Daphnia magna* // Pharmacology, biochemistry, and behavior. 2015. Vol. 137. P. 101–109. doi: 10.1016/j.pbb.2015.08.010.

17. Bedrossiantz J., Martínez-Jerónimo F., Bellot M., Raldua D., Gómez-Canela C., Barata C. A high-throughput assay for screening environmental pollutants and drugs impairing predator avoidance in *Daphnia magna* // Science of the total environment. 2020. Vol. 740. 140045. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140045.

18. Bellot M., Barata C., Gómez-Canela C. Aqueous stability and degradation of psychiatric and neuroactive compounds and its biological activity in *Daphnia magna* // Science of the total environment. 2021. Vol. 798. 149252. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149252.

19. Berthon J. L., Brousse S. Modification of migratory behavior of planktonic Crustacea in the presence of a bloom of *Microcystis aeruginosa* (Cyanobacteria) // Hydrobiologia. 1995. Vol. 300–301. P. 185–193. doi: 10.1007/bf00024460.

20. Bownik A., Stępniewska Z. Ectoine alleviates behavioural physiological and biochemical changes in *Daphnia magna* subjected to formaldehyde // Environmental science and pollution research. 2015a. Vol. 22. 15549–15562. doi: 10.1007/s11356-015-4747-5.

21. Bownik A., Stępniewska Z., Skowroński T. Effects of ectoine on behavioural physiological and biochemical parameters of *Daphnia magna* // Comparative biochemistry and physiology. Part C: toxicology & pharmacology. 2015b. Vol. 168. P. 2–10. doi: 10.1016/j.cbpc.2014.11.001.

22. Bownik A., Stępniewska Z. Protective effects of ectoine on behavioral physiological and biochemical parameters of *D. magna* subjected to hydrogen peroxide // Comparative biochemistry and physiology. Part C: toxicology & pharmacology. 2015c. Vol. 170. P. 38–49. doi:10.1016/j.cbpc.2015.02.002.

23. Bownik A. Daphnia swimming behaviour as biomarker in toxicity assessment // Science of the total environment. 2017. Vol. 601–602. P. 194–205. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.199.

24. Bownik A., Sokołowska N., Ślaska B. Effects of apomorphine a dopamine agonist on *Daphnia magna*: Imaging of swimming track density as a novel tool in the assessment of swimming activity // Science of the total environment. 2018. Vol. 635. P. 249–258. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.157.

25. Bownik A., Pawlik-Skowrońska B. Early indicators of behavioral and physiological disturbances in Daphnia induced by cyanobacterial neurotoxin anatoxin-a // Science of the total environment. 2019a. Vol. 695. 133913. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133913.

26. Bownik A. Effects of ectoine on behavioral physiological and biochemical parameters of *Daphnia magna* exposed to dimethyl sulfoxide // Science of the total environment. 2019b. Vol. 683. P. 193–201. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.257.

27. Bownik A., Kowalczyk M., Bańczerowski J. Lambda-cyhalothrin affects swimming activity and physiological responses of *Daphnia magna* // Chemosphere. 2019c. Vol. 2016. P. 805–811. doi:10.1016/j.chemosphere.2018.10.192.

28. Bownik A., Ślaska B., Dudka J. Cisplatin affects locomotor activity and physiological endpoints of *Daphnia magna* // Journal of hazardous materials. 2020. Vol. 384. 121259. doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121259.

29. Brausch K.A., Anderson T.A., Smith P.N., Maul J.D. The effect of fullerenes and functionalized fullerenes on *Daphnia magna* phototaxis and swimming behavior // Environmental toxicology and chemistry. 2011. Vol. 30. P. 878–884. doi: 10.1002/etc.442.

30. Cano A.M., Maul J.D., Saed M., Shah S.A., Green M.J., Cañas-Carrell J.E. Bioaccumulation, stress, and swimming impairment in Daphnia magna exposed to multiwalled carbon nanotubes, graphene, and graphene oxide // Environmental toxicology and chemistry. 2017. Vol. 36. P. 2199–2204. doi:

10.1002/etc.3754.

31. Chatterjee N., Choi S., Kwon O.K., Lee S., Choi J. Multigenerational impacts of organic contaminated stream water on *Daphnia magna*: A combined proteomics, epigenetics and ecotoxicity approach // Environmental pollution. 2019. Vol. 249. P. 217–224. doi: 10.1016/j.envpol.2019.03.028.

32. De Felice B., Sabatini V., Antenucci S., Gattoni G., Santo N., Bacchetta R., Ortenzi M.A., Parolini M. Polystyrene microplastics ingestion induced behavioral effects to the cladoceran *Daphnia magna* // Chemosphere. 2019. Vol. 231. P. 423–431. doi:10.1016/j.chemosphere.2019.05.115.

33. Di Nica V., Rizzi C., Finizio A., Ferraro L., Villa S. Behavioural responses of juvenile *Daphnia magna* to two insecticides // Journal of limnology. 2022. Vol. 81. doi: 10.4081/jlimnol.2021.2015.

34. Dionísio R., Daniel D., De Alkimin G.D., Nunes B. Multiparametric analysis of ciprofloxacin toxicity at ecologically relevant levels: short- and long-term effects on *Daphnia magna* // Environmental toxicology and pharmacology. 2020. Vol. 74. 103295. doi: 10.1016/j.etap.2019.103295

35. Dodson S., Ramcharan C. Size-specific swimming behavior of *Daphnia pulex* // Journal of plankton research. 1991. Vol. 13. P. 1367–1379. doi: 10.1093/plankt/13.6.1367.

36. Dodson S.I., Hanazato T., Gorski P.R. Behavioral responses of Daphnia pulex exposed to carbaryl and Chaoborus kairomone // Environmental toxicology and chemistry. 1995. Vol. 14. P. 43–50. doi: 10.1002/etc.5620140106.

37. Duquesne S., Küster E. Biochemical metabolic and behavioural responses and recovery of *Daphnia magna* after exposure to an organophosphate // Ecotoxicology and environmental safety. 2010. Vol. 73. P. 353–359. doi: 10.1016/j.ecoenv.2009.11.008.

38. Eghan K., Lee S., Kim W.-K. Cardiotoxicity and neurobehavioral effects induced by acrylamide in *Daphnia magna* // Ecotoxicology and environmental safety. 2022. Vol. 242. P. 113923. doi: 10.1016/j.ecoenv.2022.113923.

39. Erdmann U., Ebeling W., Schimansky-Geier L., Ordemann A., Moss F. Active brownian particle and random walk theories of the motions of zooplankton: application to experiments with swarms of Daphnia // arXiv: Populations and evolution. 2004. doi: 10.48550/arXiv.q-bio/0404018.

40. Ferrão-Filho A.S., Soares M.C.S., Lima R.S., Magalhães V.F. Effects of *Cylindrospermopsis raciborskii* (cyanobacteria) on the swimming behavior of Daphnia // Environmental toxicology and chemistry. 2014. Vol. 33. P. 223–229. doi: 10.1002/etc.2420.

41. Ferrario C., Parolini M., De Felice B., Villa S. Linking sub-individual and supra-individual effects in *D. magna* exposed to sub-lethal concentration of chlorpyrifos // Environmental pollution. 2018. Vol. 235. P. 411–418. doi: 10.1016/j.envpol.2017.12.113.

42. Fryer G. Functional morphology and the adaptive radiation of the Daphniidae // Philosophical transactions of the royal society. B: biological sciences. 1991. Vol. 331. P. 1–99. doi: 10.1098/rstb.1991.0001

43. Garcia R., Moss F., Nihongi A., Strickler J.R., Göller S., Erdmann U., Schimansky-Geier L., Sokolov I.M. Optimal foraging by zooplankton within patches: the case of Daphnia // Mathematical biosciences. 2007. Vol. 207. P. 165–188. doi: 10.1016/j.mbs.2006.11.014.

44. Goodrich M.S., Lech J.J. A behavioral screening assay for *Daphnia magna*: a method to assess the effects of xenobiotics on spacial orientation // Environmental toxicology and chemistry. 1990 Vol. 9. P. 21–30. doi:10.1002/etc.5620090104.

45. Grant R., Conlan H. Behavioral response of invertebrates to experimental simulation of pre-seismic chemical changes // Animals. 2015. Vol. 5. P. 206–213. doi: 10.3390/ani5020206.

46. Gutierrez M.F., Gagneten A.M., Paggi J.C. Exposure to sublethal chromium and endosulfan alter the diel vertical migration (DVM) in freshwater zooplankton crustaceans // Ecotoxicology. 2012. Vol. 21. P. 37–47. doi: 10.1007/s10646-011-0761-7.

47. Haney J.F., Lampert W. Spatial avoidance of *Microcystis aeruginosa* by Daphnia: fitness consequences and evolutionary implications // Limnology and oceanography. 2013. Vol. 58. P. 2122–2132. doi: 10.4319/lo.2013.58.6.2122.

48. Hansen L.R., Roslev P. Behavioral responses of juvenile *Daphnia magna* after exposure to glyphosate and glyphosate-copper complexes // Aquatic toxicology. 2016. Vol. 179. P. 36–43. doi:10.1016/j.aquatox.2016.08.010.

49. Huang Y., Campana O., Wlodkowic D. A Millifluidic system for analysis of Daphnia magna locomotory responses to water-born toxicants // Scientific reports. 2017. Vol. 7. P. 1–12. doi: 10.1038/s41598-017-17892-z.

50. Huang Y., Cartlidge R., Walpitagama M., Kaslin J., Campana O., Wlodkowic D. Unsuitable use of DMSO for assessing behavioral endpoints in aquatic model species // Science of the total environment. 2018. Vol. 615. P. 107–114. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.260.

51. Hussain A., Audira G., Malhotra N., Uapipatanakul B., Chen J.R., Lai Y.H., Huang J.C., Chen K.H., Lai H.T., Hsiao C.D. Multiple screening of pesticides toxicity in Zebrafish and Daphnia based on locomotor activity Alterations // Biomolecules. 2020. Vol. 10. 1224. doi: 10.3390/biom10091224.

52. Jeong T.-Y., Yoon D., Kim S., Kim H.Y., Kim S.D. Mode of action characterization for adverse effect of propranolol in *Daphnia magna* based on behavior and physiology monitoring and metabolite profiling // Environmental pollution. 2018. Vol. 233. P. 99–108. doi: 10.1016/j.envpol.2017.10.043.

53. Jüttner F., Watson S.B., von Elert E., Köster O. β-cyclocitral a grazer defence signal unique to the cyanobacterium Microcystis // Journal of chemical ecology. 2010. Vol. 36. P. 1387–1397. doi: 10.1007/s10886-010-9877-0.

54. Lass S., Spaak P. Chemically induced anti-predator defenses in plankton: a review // Hydrobiologia. 2003. Vol. 491. P. 221–239. doi: 10.1023/a:1024487804497.

55. Lin W., Jiang R., Hu S., Xiao X., Wu J., Wei S., Xiong Y., Ouyang G. Investigating the toxicities of different functionalized polystyrene nanoplastics on Daphnia magna // Ecotoxicology and environmental safety. 2019. Vol. 180. P. 509–516. doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.05.036.

56. Liu Y., Xia C., Fan Z., Wu R., Chen X, Liu Z. Implementation of fractal dimension and self-organizing map to detect toxic effects of toluene on movement tracks of *Daphnia magna* // Journal of toxicology. 2018. Vol. 7. P. 1–9. doi: 10.1155/2018/2637209.

57. Liu J., Shen J., Lu G., Xu X., Yang H., Yan Z., Chen W. Multilevel ecotoxicity assessment of environmentally relevant bisphenol F concentrations in *Daphnia magna* // Chemosphere. 2020. Vol. 240. 124917. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124917.

58. Lopes I., Baird D. J., Ribeiro R. Avoidance of copper contamination by field populations of *Daphnia longispina* // Environmental toxicology and chemistry. 2004. Vol. 23. P. 1702–1708. doi:10.1897/03-231.

59. Lovern S.B., Strickler J.R., Klaper R. Behavioral and physiological changes in *Daphnia magna* when exposed to nanoparticle suspensions // Environmental science & technology. 2007. Vol. 41. P. 4465–4470. doi: 10.1021/es062146p.

60. Magester S., Barcelona A., Colomer J., Serra T. Vertical distribution of microplastics in water bodies causes sublethal effects and changes in *Daphnia magna* swimming behavior // Ecotoxicology and environmental safety. 2021. Vol. 228. 113001. doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.113001.

61. Nagel A.H., Robinson A.S.R., Goss G.G., Glover C.N.

Effect of thallium on phototactic behaviour in *Daphnia magna* // Environmental science and pollution research. 2022. Vol. 29. P. 81740–81748. doi: 10.1007/s11356-022-21571-6.

62. Nasyrova E.I, Nikitin O.V. The swimming behavior of *Daphnia magna* ensemble in two-dimensional space from the diffusion motion point of view // IOP Conference series: earth and environmental science. 2020. Vol. 459. 042027. doi: 10.1088/1755-1315/459/4/042027.

63. Nielsen M.E., Roslev P. Behavioral responses and starvation survival of *Daphnia magna* exposed to fluoxetine and propranolol // Chemosphere. 2018. Vol. 211. P. 978–985. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.08.027.

64. Nikitin O. Aqueous medium toxicity assessment by *Daphnia magna* swimming activity change // Advances in environmental biology. 2014. Vol. 8. P. 74–78.

65. Nikitin O.V, Petrova V.M, Latypova V.Z. Bioassay of pyrethroid insecticide esfenvalerate using fractal analysis of *Daphnia magna* motion // Research journal of pharmaceutical, biological and chemical sciences. 2015. Vol. 6. P. 1729–1736.

66. Nikitin O.V., Nasyrova E.I., Nuriakhmetova V.R., Stepanova N.Y., Danilova N.V., Latypova V.Z. Toxicity assessment of polluted sediments using swimming behavior alteration test with *Daphnia magna* // IOP conference series: earth and environmental science. 2018. Vol. 107. 012068. doi: 10.1088/1755-1315/107/1/012068.

67. Nkoom M., Lu G., Liu J., Yang H., Dong H. Bioconcentration of the antiepileptic drug carbamazepine and its physiological and biochemical effects on *Daphnia magna* // Ecotoxicology and environmental safety. 2019. Vol. 172. P. 11–18. doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.01.061.

68. Noss C., Dabrunz A., Rosenfeldt R.R., Lorke A., Schulz R. Three-dimensional analysis of the swimming behavior of *Daphnia magna* exposed to nanosized titanium dioxide // PLoS ONE. 2013. Vol. 8. e80960. doi: 10.1371/journal.pone.0080960.

69. Olkova A., Zimonina N. Assessment of the toxicity of the natural and technogenic environment for motor activity of *Daphnia magna* // Journal of ecological engineering. 2020. Vol. 21. P. 11–16. doi: 10.12911/22998993/125459.

70. Olkova A., Sysolyatina M. Behavioral and lethal effects of La salt and a mixture of Cu and La salt on *Daphnia magna* Straus // Journal of ecological engineering. 2022. Vol. 23. P. 245–252. doi: 10.12911/22998993/148148.

71. Pan Y., Yan S.W., Li R.Z., Hu Y.W., Chang X.X. Lethal/sublethal responses of *Daphnia magna* to acute norfloxacin contamination and changes in phytoplankton-zooplankton interactions induced by this antibiotic // Scientific reports. 2017. Vol. 7. 40385. doi: 10.1038/srep40385.

72. Parolini M., De Felice B., Ferrario C., Salgueiro-González N., Castiglioni S, Finizio A, Tremolada P. Benzoylecgonine exposure induced oxidative stress and altered swimming behavior and reproduction in *Daphnia magna* // Environmental pollution. 2018. Vol. 232. P. 236–244. doi: 10.1016/j.envpol.2017.09.038.

73. Pawlik-Skowrońska B., Bownik A. Cyanobacterial anabaenopeptin-B, microcystins and their mixture cause toxic effects on the behavior of the crustacean *Daphnia magna* (Cladocera) // Toxicon. 2021. Vol. 198. P. 1–11. doi: 10.1016/j.toxicon.2021.04.023.

74. Pijanowska J., Kowalczewski A. Predators can induce swarming behavior and locomotory responses in Daphnia // Freshwater biology. 1997. Vol. 37. P. 649–656. doi: 10.1046/j.1365-2427.1997.00192.x.

75. Ren Z.-M., Li Z.-L., Zha J.-M., Rao K., Ma M., Wang Z., Fu R.-S. The avoidance responses of *D. magna* to the exposure of pesticides in an on-line biomonitoring system // Environmental modeling & assessment. 2009. Vol. 14. P. 405–410. doi: 10.1007/s10666-007-9136-0.

76. Ren Q., Zhao R., Wang C., Li S., Zhang T., Ren Z., Yang M., Pan H., Xu S., Zhu J., Wang X. The role of AChE in swimming behavior of *Daphnia magna*: correlation analysis of parameters affected by deltamethrin and methomyl exposure // Journal of toxicology. 2017. Vol. 5. 3265727. P. 1–11. doi: 10.1155/2017/3265727.

77. Ringelberg J. The photobehavior of Daphnia spp. as a model to explain diel vertical migration in zooplankton // Biological reviews. 1999. Vol. 74. P. 397–423. doi: 10.1111/j.1469-185x.1999.tb00036.x.

78. Robledo-Sánchez K.C.M., Guevara-Pantoja F.J., Ruiz-Suárez J.C. Video-tracking and high-speed bright field microscopy allow the determination of swimming and cardiac effects of Daphnia magna exposed to local anaesthetics // Science of the total environment. 2019. Vol. 691. P. 278–283. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.06.538

79. Rosa R., Moreira-Santos M., Lopes I., Picado A., Mendonça E, Ribeiro R. Development and sensitivity of a 12-h laboratory test with *Daphnia magna* based on avoidance of pulp mill effluents // Bulletin of environmental contamination and toxicology. 2008. Vol. 81. P. 464–469. doi: 10.1007/s00128-008-9538-y.

80. Rosa R., Materatski P., Moreira-Santos M., Sousa J.P., Ribeiro R. A scaled-up system to evaluate zooplankton spatial avoidance and the population immediate decline concentration // Environmental toxicology and chemistry. 2012. Vol. 31. P. 1301–1305. doi: 10.1002/etc.1813.

81. Schmidt K., Steinberg C.E.W., Staaks G.B.O. Influence of a xenobiotic mixture compared to single substances on swimming behavior or reproduction of *Daphnia magna* // Acta hydrochimica et hydrobiologica. 2005. Vol. 33. P. 287–300. doi: 10.1002/aheh.200400579.

82. Serra T., Soler M., Pous N., Colomer J. *Daphnia magna* filtration swimming and mortality under ammonium nitrite nitrate and phosphate // Science of the total environment. 2019. Vol. 656. P. 331–337. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.382.

83. Seyoum A., Kharlyngdoh J. B., Paylar B., Olsson P.-E. Sublethal effects of DBE-DBCH diastereomers on physiology behavior and gene expression of *Daphnia magna* // Environmental pollution. 2021. Vol. 284. 117091. doi: 10.1016/j.envpol.2021.117091.

84. Shimizu N., Ogino C., Kawanishi T., Hayashi Y. Fractal analysis of Daphnia motion for acute toxicity bioassay // Environmental toxicology. 2002. Vol. 17. P. 441–448. doi: 10.1002/tox.10077.

85. Simão F.C.P., Martínez-Jerónimo F., Blasco V., Moreno F., Porta J.M., Pestana J.L.T., Soares A.M.V.M., Raldúa D., Barata C. Using a new high-throughput video-tracking platform to assess behavioural changes in *Daphnia magna* exposed to neuro-active drugs // Science of the total environment. 2019. Vol. 662. P. 160–167. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.187.

86. Smirnov N. N. Physiology of the Cladocera. Second edition. London; San Diego: Elsevier/AP, Academic Press, an imprint of Elsevier, 2017. 401 p.

87. Sousa A.P., Nunes B. Standard and biochemical toxicological effects of zinc pyrithione in *D. magna* and *D. longispina* // Environmental toxicology and pharmacology. 2020. Vol. 80. doi: 10.1016/j.etap.2020.103402.

88. Stanley J.K., Laird J.G., Kennedy A.J., Steevens J.A. Sublethal effects of multiwalled carbon nanotube exposure in the invertebrate *Daphnia magna* // Environmental toxicology and chemistry. 2015. Vol. 35. P. 200–204. doi: 10.1002/etc.3184.

89. Storz U., Paul R. Phototaxis in water fleas is differently influenced by visible and UV light // Journal of comparative physiology. Part A. 1998. Vol. 183. P. 709–717. doi: 10.1007/s003590050293.

90. Untersteiner H., Kahapka J., Kaiser H. Behavioural response of the cladoceran *Daphnia magna* Straus to sublethal

copper stress–validation by image analysis // Aquatic toxicology. 2003. Vol. 65. 435–442. doi: 10.1016/s0166-445x(03)00157-7.

91. Uttieri M. Lagrangian description of zooplankton swimming trajectories // Journal of plankton research. 2004. Vol. 26. P. 99–105. doi: 10.1093/plankt/fbg116.

92. Vaz V.P., Nogueira D.J., Vicentini D.S., Matias W.G. Can the sonication of polystyrene nanoparticles alter the acute toxicity and swimming behavior results for *Daphnia magna*? // Environmental science and pollution research. 2021. Vol. 28. P. 14192–14198. doi: 10.1007/s11356-021-12455-2.

93. Vera-Herrera L., Araújo C., Cordero-de-Castro A., Blasco J., Picó Y. Assessing the colonization by *Daphnia magna* of pesticide-disturbed habitats (chlorpyrifos, terbuthylazine and their mixtures) and the behavioral and neurotoxic effects // Environmental pollution. 2022. Vol. 311. 119983. doi: 10.1016/j.envpol.2022.119983.

94. Villa S., Di Nica V., Bellamoli F., Pescatore T., Ferrario C., Finizio A., Lencioni V. Effects of a treated sewage effluent on behavioural traits in *Diamesa cinerella* and *Daphnia magna* // Journal of Limnology. 2018. Vol. 77. P. 121–130. doi: 10.4081/jlimnol.2018.1760.

95. Villa S., Maggioni D., Hamza H., Di Nica V., Magni S., Morosetti B., Parenti C.C., Finizio A., Binelli A., Della Torre C. Natural molecule coatings modify the fate of cerium dioxide nanoparticles in water and their ecotoxicity to *Daphnia magna* // Environmental pollution. 2020. Vol. 257. 113597. doi: 10.1016/j.envpol.2019.113597.

96. Wang P., Huang B., Chen Z., Lv X., Qian W., Zhu X., Li B., Wang Z., Cai Z. Behavioural and chronic toxicity of fullerene to *Daphnia magna*: mechanisms revealed by transcriptomic analysis // Environmental pollution. 2019. Vol. 255. 113181. doi: 10.1016/j.envpol.2019.113181.

97. Watson S.B., Jüttner F., Köster O. Daphnia behavioural responses to taste and odour compounds: ecological significance and application as an inline treatment plant monitoring tool // Water science & technology. 2007. Vol. 55. P. 23–31. doi: 10.2166/wst.2007.158.

98. Wiklund A.-K.E., Breitholtz M., Bengtsson B.-E., Adolfsson-Erici M. Sucralose – an ecotoxicological challenger? // Chemosphere. 2012. Vol. 86. P. 50–55. doi: 10.1016/j.chemosphere.2011.08.049.

99. Wolf G., Scheunders P., Selens M. Evaluation of the swimming activity of *Daphnia magna* by image analysis after administration of sublethal Cd concentrations // Comparative biochemistry and physiology. Part A. 1998. Vol. 120. P. 99–105. doi: 10.1016/s1095-6433(98)10016-8.

100. Yang H., Lu G., Yan Z., Liu J. Influence of suspended sediment on the bioavailability of benzophenone: focus on accumulation and multi-biological effects in *Daphnia magna* // Chemosphere. 2021. Vol. 275. 129974. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.129974.

101. Yang H., Zhang Z., Liu J., Liu Z., Zhou Z, Feng Q. Bioavailability of citalopram to *Daphnia magna* in the presence of suspended sediments with various properties // Marine pollution bulletin. 2022. Vol. 175. 113352. doi: 10.1016/j.marpolbul.2022.113352.

102. Zein M.A., McElmurry S.P., Kashian D.R., Savolainen P.T., Pitts D.K. Toxic effects of combined stressors on *Daphnia pulex*: interactions between diazinon 4-nonylphenol and wastewater effluent // Environmental toxicology and chemistry. 2015. Vol. 34. P. 1145–1153. doi: 10.1002/etc.2908.

References

1. Budina D.V., Ashikhmina T.Ya., Olkova A.S. Issledovanie toksicheskikh effektov vodnykh vytyazhek iz PVKh plastikatov [Toxic effects' analysis of water extracts of polyvinylchloride compounds] // Butlerovskie soobshcheniya [Butlerov readings]. 2017. Vol. 50, No 6. P. 112–118. doi: 10.37952/roi-jbc-01/17-50-6-112.

2. Ivleva I.V. Biologicheskie osnovy i metody massovogo kul'tivirovaniya kormovykh bespozvonochnykh [Biological principles and methods of mass cultivation of food invertebrates]. Moscow: Nauka, 1969. 171 p.

3. Kotov A.A. Morfologiya i filogeniya Anomopoda (Crustacea: Cladocera) [Morphology and phylogeny of Anomopoda (Crustacea: Cladocera)]. Moscow: KMK Scientific Press Ltd, 2013. 638 p.

4. Nikitin O.V., Nasyrova E.I. Vliyanie mikrotsistinov na povedencheskuyu aktivnost' dafnii [The effect of microcystins on the behavioral activity of daphnia] // Ekologicheskie problemy basseinov krupnykh rek [Environmental problems of large river basins]. Tolyatti: Anna, 2018. P. 230–232. doi: 10.24411/9999-002A-2018-10099.

5. Nikitin O.V., Nasyrova E.I., Kuz'min R.S., Minnegulova L.M., Latypova V.Z., Ashikhmina T.Ya.. Vliyanie chastits mikroplastika polistirola na morfologicheskie i funktsional'nye pokazateli *Daphnia magna* [Effects of polystyrene microplastic particles on the morphological and functional parameters of *Daphnia magna*] // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya [Theoretical and applied ecology]. 2022. No 4. P. 196–203. doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-196-203.

6. Olkova A.S. Usloviya kul'tivirovaniya i mnogoobrazie test-funktsii *Daphnia magna* Straus pri biotestirovanii [The conditions of cultivation and the variety of test functions of *Daphnia magna* Straus in bioassay] // Voda i ekologiya: problemy i resheniya [Water and ecology: problems and solutions]. 2017. No 1. P. 63–82. doi: 10.23968/2305-3488.2017.19.1.63-82.

7. Olkova A.S. Tekhnologiya snizheniya toksichnosti pochvy, zagryaznennoi benzinom, s pomoshch'yu torfa i torfogelya [Know-how to reduce the toxicity of gasoline-polluted soil using peat and peat gel: bench tests] // Ekologiya i promyshlennost' Rossii [Ecology and industry of Russia]. 2022. Vol. 26, No 9. P. 54–59. doi: 10.18412/1816-0395-2022-9-54-59.

8. Sadykova K.N., Nasyrova E.I., Nikitin O.V. Vliyanie farmatsevticheskogo preparata gidroksizina na dvigatel'nuyu aktivnost' *Daphnia magna* [Effects of the pharmaceutical preparation hydroxyzine on the swimming activity of *Daphnia magna*] // Molodezhnye issledovaniya segodnya [Youth studies today]. Petrozavodsk: Novaya Nauka, 2022. P. 182–186.

9. Smirnov N.N. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy issledovanii fiziologii vetvistousykh rakoobraznykh (Cladocera, Crustacea) [The recent state and prospects of studying the Cladocera (Crustacea) physiology] // Zoologicheskii zhurnal [Zoological journal]. 2016. Vol. 95, No 7. P. 788–804. doi: 10.7868/S0044513416070102.

10. Abe F.R., Machado A.L., Soares A.M.V.M., de Oliveira D.P., Pestana J.L.T. Life history and behavior effects of synthetic and natural dyes on *Daphnia magna* // Chemosphere. 2019. Vol. 236. 124390. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124390.

11. Alla L.N.R., Monshi M., Siddiqua Z., Shields J., Alame K., Wahls A., Akemann C., Meyer D., Crofts E.J., Saad F., El-Nachef J., Antoon M., Nakhle R., Hijazi N., Hamid M., Gurdziel K., McElmurry S.P., Kashian D.R., Baker T.R., Pitts D.K. Detection of endocrine disrupting chemicals in *Danio rerio* and *Daphnia pulex*: Step-one behavioral screen // Chemosphere. 2021. Vol. 271. 129442. doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.129442.

12. Artells E., Issartel J., Auffan M., Borschneck D., Thill A., Tella M., Brousset L., Rose J., Bottero J.Y., Thiéry A. Exposure to cerium dioxide nanoparticles differently affect swimming performance and survival in two Daphnid species // PLoS ONE. 2013. Vol. 8. e71260. doi:10.1371/journal.pone.0071260.

13. Ayodeji O.J., Awoyemi O.M. Beef cattle feedlot surface water containing multi-class agrochemicals elicits physiological

and behavioral responses among *Daphnia pulex* // Environmental monitoring and assessment. 2021. Vol. 193. P. 1–15. doi: 10.1007/s10661-021-09181-0.

14. Baillieul M., Blust R. Analysis of the swimming velocity of Cd-stressed *Daphnia magna* // Aquatic toxicology. 1999. Vol. 44. P. 245–254. doi: 10.1016/s0166-445x(98)00080-0.

15. Bandara K., Varpe Ø., Wijewardene L., Tverberg V., Eiane K. Two hundred years of zooplankton vertical migration research // Biological reviews of the Cambridge philosophical society. 2021. Vol. 96. P. 1547–1589. doi: 10.1111/brv.12715.

16. Barrozo E.R., Fowler D.A., Beckman M.L. Exposure to D2-like dopamine receptor agonists inhibits swimming in *Daphnia magna* // Pharmacology, biochemistry, and behavior. 2015. Vol. 137. P. 101–109. doi: 10.1016/j.pbb.2015.08.010.

17. Bedrossiantz J., Martínez-Jerónimo F., Bellot M., Raldua D., Gómez-Canela C., Barata C. A high-throughput assay for screening environmental pollutants and drugs impairing predator avoidance in *Daphnia magna* // Science of the total environment. 2020. Vol. 740. 140045. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140045.

18. Bellot M., Barata C., Gómez-Canela C. Aqueous stability and degradation of psychiatric and neuroactive compounds and its biological activity in *Daphnia magna* // Science of the total environment. 2021. Vol. 798. 149252. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149252.

19. Berthon J. L., Brousse S. Modification of migratory behavior of planktonic Crustacea in the presence of a bloom of *Microcystis aeruginosa* (Cyanobacteria) // Hydrobiologia. 1995. Vol. 300–301. P. 185–193. doi: 10.1007/bf00024460.

20. Bownik A., Stępniewska Z. Ectoine alleviates behavioural physiological and biochemical changes in *Daphnia magna* subjected to formaldehyde // Environmental science and pollution research. 2015a. Vol. 22. 15549–15562. doi: 10.1007/s11356-015-4747-5.

21. Bownik A., Stępniewska Z., Skowroński T. Effects of ectoine on behavioural physiological and biochemical parameters of *Daphnia magna* // Comparative biochemistry and physiology. Part C: toxicology & pharmacology. 2015b. Vol. 168. P. 2–10. doi: 10.1016/j.cbpc.2014.11.001.

22. Bownik A., Stępniewska Z. Protective effects of ectoine on behavioral physiological and biochemical parameters of *D. magna* subjected to hydrogen peroxide // Comparative biochemistry and physiology. Part C: toxicology & pharmacology. 2015c. Vol. 170. P. 38–49. doi:10.1016/j.cbpc.2015.02.002.

23. Bownik A. Daphnia swimming behaviour as biomarker in toxicity assessment // Science of the total environment. 2017. Vol. 601–602. P. 194–205. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.199.

24. Bownik A., Sokołowska N., Ślaska B. Effects of apomorphine a dopamine agonist on *Daphnia magna*: Imaging of swimming track density as a novel tool in the assessment of swimming activity // Science of the total environment. 2018. Vol. 635. P. 249–258. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.157.

25. Bownik A., Pawlik-Skowrońska B. Early indicators of behavioral and physiological disturbances in Daphnia induced by cyanobacterial neurotoxin anatoxin-a // Science of the total environment. 2019a. Vol. 695. 133913. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133913.

26. Bownik A. Effects of ectoine on behavioral physiological and biochemical parameters of *Daphnia magna* exposed to dimethyl sulfoxide // Science of the total environment. 2019b. Vol. 683. P. 193–201. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.257.

27. Bownik A., Kowalczyk M., Bańczerowski J. Lambda-cyhalothrin affects swimming activity and physiological responses of *Daphnia magna* // Chemosphere. 2019c. Vol. 2016. P. 805–811. doi:10.1016/j.chemosphere.2018.10.192.

28. Bownik A., Ślaska B., Dudka J. Cisplatin affects locomotor activity and physiological endpoints of *Daphnia magna* // Journal of hazardous materials. 2020. Vol. 384. 121259. doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121259.

29. Brausch K.A., Anderson T.A., Smith P.N., Maul J.D. The effect of fullerenes and functionalized fullerenes on *Daphnia magna* phototaxis and swimming behavior // Environmental toxicology and chemistry. 2011. Vol. 30. P. 878–884. doi: 10.1002/etc.442.

30. Cano A.M., Maul J.D., Saed M., Shah S.A., Green M.J., Cañas-Carrell J.E. Bioaccumulation, stress, and swimming impairment in Daphnia magna exposed to multiwalled carbon nanotubes, graphene, and graphene oxide // Environmental toxicology and chemistry. 2017. Vol. 36. P. 2199–2204. doi: 10.1002/etc.3754.

31. Chatterjee N., Choi S., Kwon O.K., Lee S., Choi J. Multi-generational impacts of organic contaminated stream water on *Daphnia magna*: A combined proteomics, epigenetics and ecotoxicity approach // Environmental pollution. 2019. Vol. 249. P. 217–224. doi: 10.1016/j.envpol.2019.03.028.

32. De Felice B., Sabatini V., Antenucci S., Gattoni G., Santo N., Bacchetta R., Ortenzi M.A., Parolini M. Polystyrene microplastics ingestion induced behavioral effects to the cladoceran *Daphnia magna* // Chemosphere. 2019. Vol. 231. P. 423–431. doi:10.1016/j.chemosphere.2019.05.115.

33. Di Nica V., Rizzi C., Finizio A., Ferraro L., Villa S. Behavioural responses of juvenile *Daphnia magna* to two insecticides // Journal of limnology. 2022. Vol. 81. doi: 10.4081/jlimnol.2021.2015.

34. Dionísio R., Daniel D., De Alkimin G.D., Nunes B. Multi-parametric analysis of ciprofloxacin toxicity at ecologically relevant levels: short- and long-term effects on *Daphnia magna* // Environmental toxicology and pharmacology. 2020. Vol. 74. 103295. doi: 10.1016/j.etap.2019.103295

35. Dodson S., Ramcharan C. Size-specific swimming behavior of *Daphnia pulex* // Journal of plankton research. 1991. Vol. 13. P. 1367–1379. doi: 10.1093/plankt/13.6.1367.

36. Dodson S.I., Hanazato T., Gorski P.R. Behavioral responses of Daphnia pulex exposed to carbaryl and Chaoborus kairomone // Environmental toxicology and chemistry. 1995. Vol. 14. P. 43–50. doi: 10.1002/etc.5620140106.

37. Duquesne S., Küster E. Biochemical metabolic and behavioural responses and recovery of *Daphnia magna* after exposure to an organophosphate // Ecotoxicology and environmental safety. 2010. Vol. 73. P. 353–359. doi: 10.1016/j.ecoenv.2009.11.008.

38. Eghan K., Lee S., Kim W.-K. Cardiotoxicity and neurobehavioral effects induced by acrylamide in *Daphnia magna* // Ecotoxicology and environmental safety. 2022. Vol. 242. P. 113923. doi: 10.1016/j.ecoenv.2022.113923.

39. Erdmann U., Ebeling W., Schimansky-Geier L., Ordemann A., Moss F. Active brownian particle and random walk theories of the motions of zooplankton: application to experiments with swarms of Daphnia // arXiv: Populations and evolution. 2004. doi: 10.48550/arXiv.q-bio/0404018.

40. Ferrão-Filho A.S., Soares M.C.S., Lima R.S., Magalhães V.F. Effects of *Cylindrospermopsis raciborskii* (cyanobacteria) on the swimming behavior of Daphnia // Environmental toxicology and chemistry. 2014. Vol. 33. P. 223–229. doi: 10.1002/etc.2420.

41. Ferrario C., Parolini M., De Felice B., Villa S. Linking sub-individual and supra-individual effects in *D. magna* exposed to sub-lethal concentration of chlorpyrifos // Environmental pollution. 2018. Vol. 235. P. 411–418. doi: 10.1016/j.envpol.2017.12.113.

42. Fryer G. Functional morphology and the adaptive radiation of the Daphniidae // Philosophical transactions of the royal society. B: biological sciences. 1991. Vol. 331. P. 1–99. doi: 10.1098/rstb.1991.0001

43. Garcia R., Moss F., Nihongi A., Strickler J.R., Göller S., Erdmann U., Schimansky-Geier L., Sokolov I.M. Optimal

foraging by zooplankton within patches: the case of Daphnia // Mathematical biosciences. 2007. Vol. 207. P. 165–188. doi: 10.1016/j.mbs.2006.11.014.

44. Goodrich M.S., Lech J.J. A behavioral screening assay for *Daphnia magna*: a method to assess the effects of xenobiotics on spacial orientation // Environmental toxicology and chemistry. 1990 Vol. 9. P. 21–30. doi:10.1002/etc.5620090104.

45. Grant R., Conlan H. Behavioral response of invertebrates to experimental simulation of pre-seismic chemical changes // Animals. 2015. Vol. 5. P. 206–213. doi: 10.3390/ani5020206.

46. Gutierrez M.F., Gagneten A.M., Paggi J.C. Exposure to sublethal chromium and endosulfan alter the diel vertical migration (DVM) in freshwater zooplankton crustaceans // Ecotoxicology. 2012. Vol. 21. P. 37–47. doi: 10.1007/s10646-011-0761-7.

47. Haney J.F., Lampert W. Spatial avoidance of *Microcystis aeruginosa* by Daphnia: fitness consequences and evolutionary implications // Limnology and oceanography. 2013. Vol. 58. P. 2122–2132. doi: 10.4319/lo.2013.58.6.2122.

48. Hansen L.R., Roslev P. Behavioral responses of juvenile *Daphnia magna* after exposure to glyphosate and glyphosate-copper complexes // Aquatic toxicology. 2016. Vol. 179. P. 36–43. doi:10.1016/j.aquatox.2016.08.010.

49. Huang Y., Campana O., Wlodkowic D. A Millifluidic system for analysis of Daphnia magna locomotory responses to water-born toxicants // Scientific reports. 2017. Vol. 7. P. 1–12. doi: 10.1038/s41598-017-17892-z.

50. Huang Y., Cartlidge R., Walpitagama M., Kaslin J., Campana O., Wlodkowic D. Unsuitable use of DMSO for assessing behavioral endpoints in aquatic model species // Science of the total environment. 2018. Vol. 615. P. 107–114. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.260.

51. Hussain A., Audira G., Malhotra N., Uapipatanakul B., Chen J.R., Lai Y.H., Huang J.C., Chen K.H., Lai H.T., Hsiao C.D. Multiple screening of pesticides toxicity in Zebrafish and Daphnia based on locomotor activity Alterations // Biomolecules. 2020. Vol. 10. 1224. doi: 10.3390/biom10091224.

52. Jeong T.-Y., Yoon D., Kim S., Kim H.Y., Kim S.D. Mode of action characterization for adverse effect of propranolol in *Daphnia magna* based on behavior and physiology monitoring and metabolite profiling // Environmental pollution. 2018. Vol. 233. P. 99–108. doi: 10.1016/j.envpol.2017.10.043.

53. Jüttner F., Watson S.B., von Elert E., Köster O. β-cyclocitral a grazer defence signal unique to the cyanobacterium Microcystis // Journal of chemical ecology. 2010. Vol. 36. P. 1387–1397. doi: 10.1007/s10886-010-9877-0.

54. Lass S., Spaak P. Chemically induced anti-predator defenses in plankton: a review // Hydrobiologia. 2003. Vol. 491. P. 221–239. doi: 10.1023/a:1024487804497.

55. Lin W., Jiang R., Hu S., Xiao X., Wu J., Wei S., Xiong Y., Ouyang G. Investigating the toxicities of different functionalized polystyrene nanoplastics on Daphnia magna // Ecotoxicology and environmental safety. 2019. Vol. 180. P. 509–516. doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.05.036.

56. Liu Y., Xia C., Fan Z., Wu R., Chen X, Liu Z. Implementation of fractal dimension and self-organizing map to detect toxic effects of toluene on movement tracks of *Daphnia magna* // Journal of toxicology. 2018. Vol. 7. P. 1–9. doi: 10.1155/2018/2637209.

57. Liu J., Shen J., Lu G., Xu X., Yang H., Yan Z., Chen W. Multilevel ecotoxicity assessment of environmentally relevant bisphenol F concentrations in *Daphnia magna* // Chemosphere. 2020. Vol. 240. 124917. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124917.

58. Lopes I., Baird D. J., Ribeiro R. Avoidance of copper contamination by field populations of *Daphnia longispina* // Environmental toxicology and chemistry. 2004. Vol. 23. P. 1702–1708. doi:10.1897/03-231.

59. Lovern S.B., Strickler J.R., Klaper R. Behavioral and physiological changes in *Daphnia magna* when exposed to nanoparticle suspensions // Environmental science & technology. 2007. Vol. 41. P. 4465–4470. doi: 10.1021/es062146p.

60. Magester S., Barcelona A., Colomer J., Serra T. Vertical distribution of microplastics in water bodies causes sublethal effects and changes in *Daphnia magna* swimming behavior // Ecotoxicology and environmental safety. 2021. Vol. 228. 113001. doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.113001.

61. Nagel A.H., Robinson A.S.R., Goss G.G., Glover C.N. Effect of thallium on phototactic behaviour in *Daphnia magna* // Environmental science and pollution research. 2022. Vol. 29. P. 81740–81748. doi: 10.1007/s11356-022-21571-6.

62. Nasyrova E.I, Nikitin O.V. The swimming behavior of *Daphnia magna* ensemble in two-dimensional space from the diffusion motion point of view // IOP Conference series: earth and environmental science. 2020. Vol. 459. 042027. doi: 10.1088/1755-1315/459/4/042027.

63. Nielsen M.E., Roslev P. Behavioral responses and starvation survival of *Daphnia magna* exposed to fluoxetine and propranolol // Chemosphere. 2018. Vol. 211. P. 978–985. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.08.027.

64. Nikitin O. Aqueous medium toxicity assessment by *Daphnia magna* swimming activity change // Advances in environmental biology. 2014. Vol. 8. P. 74–78.

65. Nikitin O.V, Petrova V.M, Latypova V.Z. Bioassay of pyrethroid insecticide esfenvalerate using fractal analysis of *Daphnia magna* motion // Research journal of pharmaceutical, biological and chemical sciences. 2015. Vol. 6. P. 1729–1736.

66. Nikitin O.V., Nasyrova E.I., Nuriakhmetova V.R., Stepanova N.Y., Danilova N.V., Latypova V.Z. Toxicity assessment of polluted sediments using swimming behavior alteration test with *Daphnia magna* // IOP conference series: earth and environmental science. 2018. Vol. 107. 012068. doi: 10.1088/1755-1315/107/1/012068.

67. Nkoom M., Lu G., Liu J., Yang H., Dong H. Bioconcentration of the antiepileptic drug carbamazepine and its physiological and biochemical effects on *Daphnia magna* // Ecotoxicology and environmental safety. 2019. Vol. 172. P. 11–18. doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.01.061.

68. Noss C., Dabrunz A., Rosenfeldt R.R., Lorke A., Schulz R. Three-dimensional analysis of the swimming behavior of *Daphnia magna* exposed to nanosized titanium dioxide // PLoS ONE. 2013. Vol. 8. e80960. doi: 10.1371/journal.pone.0080960.

69. Olkova A., Zimonina N. Assessment of the toxicity of the natural and technogenic environment for motor activity of *Daphnia magna* // Journal of ecological engineering. 2020. Vol. 21. P. 11–16. doi: 10.12911/22998993/125459.

70. Olkova A., Sysolyatina M. Behavioral and lethal effects of La salt and a mixture of Cu and La salt on *Daphnia magna* Straus // Journal of ecological engineering. 2022. Vol. 23. P. 245–252. doi: 10.12911/22998993/148148.

71. Pan Y., Yan S.W., Li R.Z., Hu Y.W., Chang X.X. Lethal/sublethal responses of *Daphnia magna* to acute norfloxacin contamination and changes in phytoplankton-zooplankton interactions induced by this antibiotic // Scientific reports. 2017. Vol. 7. 40385. doi: 10.1038/srep40385.

72. Parolini M., De Felice B., Ferrario C., Salgueiro-González N., Castiglioni S, Finizio A, Tremolada P. Benzoylecgonine exposure induced oxidative stress and altered swimming behavior and reproduction in *Daphnia magna* // Environmental pollution. 2018. Vol. 232. P. 236–244. doi: 10.1016/j.envpol.2017.09.038.

73. Pawlik-Skowrońska B., Bownik A. Cyanobacterial anabaenopeptin-B, microcystins and their mixture cause toxic effects on the behavior of the crustacean *Daphnia magna* (Cladocera) // Toxicon. 2021. Vol. 198. P. 1–11. doi: 10.1016/j.

toxicon.2021.04.023.

74. Pijanowska J., Kowalczewski A. Predators can induce swarming behavior and locomotory responses in Daphnia // Freshwater biology. 1997. Vol. 37. P. 649–656. doi: 10.1046/j.1365-2427.1997.00192.x.

75. Ren Z.-M., Li Z.-L., Zha J.-M., Rao K., Ma M., Wang Z., Fu R.-S. The avoidance responses of *D. magna* to the exposure of pesticides in an on-line biomonitoring system // Environmental modeling & assessment. 2009. Vol. 14. P. 405–410. doi: 10.1007/s10666-007-9136-0.

76. Ren Q., Zhao R., Wang C., Li S., Zhang T., Ren Z., Yang M., Pan H., Xu S., Zhu J., Wang X. The role of AChE in swimming behavior of *Daphnia magna*: correlation analysis of parameters affected by deltamethrin and methomyl exposure // Journal of toxicology. 2017. Vol. 5. 3265727. P. 1–11. doi: 10.1155/2017/3265727.

77. Ringelberg J. The photobehavior of Daphnia spp. as a model to explain diel vertical migration in zooplankton // Biological reviews. 1999. Vol. 74. P. 397–423. doi: 10.1111/j.1469-185x.1999.tb00036.x.

78. Robledo-Sánchez K.C.M., Guevara-Pantoja F.J., Ruiz-Suárez J.C. Video-tracking and high-speed bright field microscopy allow the determination of swimming and cardiac effects of Daphnia magna exposed to local anaesthetics // Science of the total environment. 2019. Vol. 691. P. 278–283. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.06.538

79. Rosa R., Moreira-Santos M., Lopes I., Picado A., Mendonça E, Ribeiro R. Development and sensitivity of a 12-h laboratory test with *Daphnia magna* based on avoidance of pulp mill effluents // Bulletin of environmental contamination and toxicology. 2008. Vol. 81. P. 464–469. doi: 10.1007/s00128-008-9538-y.

80. Rosa R., Materatski P., Moreira-Santos M., Sousa J.P., Ribeiro R. A scaled-up system to evaluate zooplankton spatial avoidance and the population immediate decline concentration // Environmental toxicology and chemistry. 2012. Vol. 31. P. 1301–1305. doi: 10.1002/etc.1813.

81. Schmidt K., Steinberg C.E.W., Staaks G.B.O. Influence of a xenobiotic mixture compared to single substances on swimming behavior or reproduction of *Daphnia magna* // Acta hydrochimica et hydrobiologica. 2005. Vol. 33. P. 287–300. doi: 10.1002/aheh.200400579.

82. Serra T., Soler M., Pous N., Colomer J. *Daphnia magna* filtration swimming and mortality under ammonium nitrite nitrate and phosphate // Science of the total environment. 2019. Vol. 656. P. 331–337. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.382.

83. Seyoum A., Kharlyngdoh J. B., Paylar B., Olsson P.-E. Sublethal effects of DBE-DBCH diastereomers on physiology behavior and gene expression of *Daphnia magna* // Environmental pollution. 2021. Vol. 284. 117091. doi: 10.1016/j.envpol.2021.117091.

84. Shimizu N., Ogino C., Kawanishi T., Hayashi Y. Fractal analysis of Daphnia motion for acute toxicity bioassay // Environmental toxicology. 2002. Vol. 17. P. 441–448. doi: 10.1002/tox.10077.

85. Simão F.C.P., Martínez-Jerónimo F., Blasco V., Moreno F., Porta J.M., Pestana J.L.T., Soares A.M.V.M., Raldúa D., Barata C. Using a new high-throughput video-tracking platform to assess behavioural changes in *Daphnia magna* exposed to neuro-active drugs // Science of the total environment. 2019. Vol. 662. P. 160–167. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.187.

86. Smirnov N. N. Physiology of the Cladocera. Second edition. London; San Diego: Elsevier/AP, Academic Press, an imprint of Elsevier, 2017. 401 p.

87. Sousa A.P., Nunes B. Standard and biochemical toxicological effects of zinc pyrithione in *D. magna* and *D. longispina* // Environmental toxicology and pharmacology. 2020. Vol. 80. doi: 10.1016/j.etap.2020.103402.

88. Stanley J.K., Laird J.G., Kennedy A.J., Steevens J.A. Sublethal effects of multiwalled carbon nanotube exposure in the invertebrate *Daphnia magna* // Environmental toxicology and chemistry. 2015. Vol. 35. P. 200–204. doi: 10.1002/etc.3184.

89. Storz U., Paul R. Phototaxis in water fleas is differently influenced by visible and UV light // Journal of comparative physiology. Part A. 1998. Vol. 183. P. 709–717. doi: 10.1007/s003590050293.

90. Untersteiner H., Kahapka J., Kaiser H. Behavioural response of the cladoceran *Daphnia magna* Straus to sublethal copper stress–validation by image analysis // Aquatic toxicology. 2003. Vol. 65. 435–442. doi: 10.1016/s0166-445x(03)00157-7.

91. Uttieri M. Lagrangian description of zooplankton swimming trajectories // Journal of plankton research. 2004. Vol. 26. P. 99–105. doi: 10.1093/plankt/fbg116.

92. Vaz V.P., Nogueira D.J., Vicentini D.S., Matias W.G. Can the sonication of polystyrene nanoparticles alter the acute toxicity and swimming behavior results for *Daphnia magna*? // Environmental science and pollution research. 2021. Vol. 28. P. 14192–14198. doi: 10.1007/s11356-021-12455-2.

93. Vera-Herrera L., Araújo C., Cordero-de-Castro A., Blasco J., Picó Y. Assessing the colonization by *Daphnia magna* of pesticide-disturbed habitats (chlorpyrifos, terbuthylazine and their mixtures) and the behavioral and neurotoxic effects // Environmental pollution. 2022. Vol. 311. 119983. doi: 10.1016/j.envpol.2022.119983.

94. Villa S., Di Nica V., Bellamoli F., Pescatore T., Ferrario C., Finizio A., Lencioni V. Effects of a treated sewage effluent on behavioural traits in *Diamesa cinerella* and *Daphnia magna* // Journal of Limnology. 2018. Vol. 77. P. 121–130. doi: 10.4081/jlimnol.2018.1760.

95. Villa S., Maggioni D., Hamza H., Di Nica V., Magni S., Morosetti B., Parenti C.C., Finizio A., Binelli A., Della Torre C. Natural molecule coatings modify the fate of cerium dioxide nanoparticles in water and their ecotoxicity to *Daphnia magna* // Environmental pollution. 2020. Vol. 257. 113597. doi: 10.1016/j.envpol.2019.113597.

96. Wang P., Huang B., Chen Z., Lv X., Qian W., Zhu X., Li B., Wang Z., Cai Z. Behavioural and chronic toxicity of fullerene to *Daphnia magna*: mechanisms revealed by transcriptomic analysis // Environmental pollution. 2019. Vol. 255. 113181. doi: 10.1016/j.envpol.2019.113181.

97. Watson S.B., Jüttner F., Köster O. Daphnia behavioural responses to taste and odour compounds: ecological significance and application as an inline treatment plant monitoring tool // Water science & technology. 2007. Vol. 55. P. 23–31. doi: 10.2166/wst.2007.158.

98. Wiklund A.-K.E., Breitholtz M., Bengtsson B.-E., Adolfsson-Erici M. Sucralose – an ecotoxicological challenger? // Chemosphere. 2012. Vol. 86. P. 50–55. doi: 10.1016/j.chemosphere.2011.08.049.

99. Wolf G., Scheunders P., Selens M. Evaluation of the swimming activity of *Daphnia magna* by image analysis after administration of sublethal Cd concentrations // Comparative biochemistry and physiology. Part A. 1998. Vol. 120. P. 99–105. doi: 10.1016/s1095-6433(98)10016-8.

100. Yang H., Lu G., Yan Z., Liu J. Influence of suspended sediment on the bioavailability of benzophenone: focus on accumulation and multi-biological effects in *Daphnia magna* // Chemosphere. 2021. Vol. 275. 129974. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.129974.

101. Yang H., Zhang Z., Liu J., Liu Z., Zhou Z, Feng Q. Bioavailability of citalopram to *Daphnia magna* in the presence of suspended sediments with various properties // Marine pollution bulletin. 2022. Vol. 175. 113352. doi: 10.1016/j.marpolbul.2022.113352.

102. Zein M.A., McElmurry S.P., Kashian D.R., Savolainen P.T., Pitts D.K. Toxic effects of combined stressors on *Daphnia pulex*: interactions between diazinon 4-nonylphenol and wastewater effluent // Environmental toxicology and chemistry. 2015. Vol. 34. P. 1145–1153. doi: 10.1002/etc.2908.

Nasyrova E.I., Nikitin O.V., Latypova V.Z. **Swimming behavior parameters of Daphnia as indicators of environmental toxicity**.

The review of scientific publications on the parameters and patterns of swimming behavior in animals of the genus Daphnia is presented. Daphnia are utilized as indicators for the presence of various organic and inorganic pollutants in aquatic environments, making them of interest to ecotoxicology. The analysis has revealed substantial share of studies demonstrating the diversity of sensitive testing methods based on the assessment of various parameters of Daphnia swimming behavior.

Keywords: Daphnia; swimming parameters; behavioral activity; toxicity; ecotoxicology.

Раскрытие информации о конфликте интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / Disclosure of conflict of interest information: The author claims no conflict of interest

Информация о статье / Information about the article
Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 15.01.2024
Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 31.01.2024
Принята к публикации / Accepted for publication: 08.02.2024

Сведения об авторах
Насырова Эльвира Ильгизаровна, ассистент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, E-mail: naselvira@mail.ru.
Никитин Олег Владимирович, кандидат географических наук, доцент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, E-mail: olnova@mail.ru.
Латыпова Венера Зиннатовна, доктор химических наук, профессор, профессор, член-корреспондент АН РТ, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18; главный научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: ecoanrt@yandex.ru.

Information about the authors
Elvira I. Nasyrova, assistant, Kazan Federal University, 18, Kremlyovskaya st., Kazan, 420008, Russia, E-mail: naselvira@mail.ru.
Oleg V. Nikitin, Ph.D. in Geography, Associate Professor, Kazan Federal University, 18, Kremlyovskaya st., Kazan, 420008, Russia, E-mail: oleg.nikitin@kpfu.ru.
Venera Z. Latypova, D.Sci. in Chemistry, Professor, Corresponding Member of Tatarstan Academy of Sciences, Professor, Kazan Federal University, 18, Kremlyovskaya st., Kazan, 420008, Russia; Chief Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daurskaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: ecoanrt@yandex.ru.