

По юридическим определениям в ст. 1 Закона Республики Беларусь «Об охране окружающей среды» от 26 ноября 1992 г. №1982-ХІІ (с изменениями и дополнениями) [2]:

«...вред, причиненный окружающей среде, – имеющее денежную оценку отрицательное изменение окружающей среды или отдельных компонентов природной среды, природных или природно-антропогенных объектов, выразившееся в их загрязнении, деградации, истощении, повреждении, уничтожении, незаконном изъятии и (или) ином ухудшении их состояния, в результате вредного воздействия на окружающую среду, связанного с нарушением требований в области охраны окружающей среды, иным нарушением законодательства Республики Беларусь».

Размер возмещения вреда, причиненного окружающей среде, для категории земель – земли сельскохозяйственного назначения, вид земель – под древесно-кустарниковой растительностью (насаждениями), применяется приложение 5 к Постановлению [6] «Таксы для определения размера возмещения вреда, причиненного окружающей среде деградацией земель (включая почвы) любой категории, за исключением земель лесного фонда» с применением одного коэффициента исчисляется по следующей формуле:

$$C = T * K_u * P_i,$$

где C – размер возмещения вреда, причиненного окружающей среде, в белорусских рублях;

T – таксы, установленные в приложении 5 к Постановлению, утвердившему настоящее Положение, умноженные на размер базовой величины, установленной законодательством на дату составления акта об установлении факта причинения вреда окружающей среде;

K_u – соответствующие коэффициенты, установленные постановлением, утвердившим настоящее Положение;

P_i – показатель площади земель (включая почвы) в квадратных метрах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Плешаков, А.М. Уголовно-правовая борьба с экологическими преступлениями : автореф.
2. дис. ... д-ра юрид. наук / А.М. Плешаков.– М., 1994.
3. Закон Республики Беларусь «Об охране окружающей среды» от 26 ноября 1992 г. №1982-ХІІ (с изменениями и дополнениями).
4. Кодекс Республики Беларусь о Земле от 23 июля 2008 г. №425-3 (в ред. Закона Республики Беларусь от 18.07.2022 N 195-3).
5. Экологические нормы и правила ЭкоНП 17.03.01–001–2021 «Охрана окружающей среды и природопользование. Земли (в том числе почвы). Нормативы качества окружающей среды. Дифференцированные нормативы содержания химических веществ в почвах и требования к их применению» (утверждены Постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь №13-Т от 25.11.2021).
6. Экологические нормы и правила ЭкоНП 17.01.06–001–2017 «Охрана окружающей среды и природопользование. Требования экологической безопасности» (в ред. постановлений Минприроды от 21.11.2022 №23-Т, от 29.04.2023 №4-Т).
7. Постановление Совета Министров Республики Беларусь «О таксах для определения размера возмещения вреда, причиненного окружающей среде, и порядке его исчисления» от 11 апреля 2022 г. № 219.

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ НА ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ БОЛЬШОЙ ДАФНИИ (*DAPHNIA MAGNA*)

ECOLOGICAL ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF HEAVY METALS ON THE PHYSIOLOGICAL INDICATORS OF *DAPHNIA MAGNA*

Е. П. Живицкая, А. Г. Сыса, А. К. Галах, А. П. Яковлева

E. P. Zhivitskaya, A. G. Sysa, A. K. Galakh, A. P. Yakovleva

Учреждение образования «Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ,
г. Минск, Республика Беларусь
jaalina04@gmail.com

International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, ISEI BSU,
Minsk, Republic of Belarus

Воздействие тяжелых металлов на водные организмы представляет собой серьезную проблему для окружающей среды из-за их потенциального воздействия на экосистемы и здоровье человека. В данном исследовании изучалась острая иммобилизационная токсичность *Daphnia magna* в ответ на воздействие катионов тяжелых металлов, включая медь (Cu^{2+}), кадмий (Cd^{2+}), свинец (Pb^{2+}) и никель (Ni^{2+}).

В работе использовали разведения стандартных водных растворов катионов тяжелых металлов, в качестве контрольной среды использовали искусственную пресную воду. Испытание на острую токсичность включало воздействие тестируемых растворов на особей *Daphnia magna* и оценку эффектов иммобилизации после 48 часов воздействия. Эффекты количественно оценивали как средний процент иммобилизации организма, при этом статистический анализ и оценка параметров модели, проведенные для определения уровней токсичности каждого катиона тяжелого металла. Результаты выявили существенные различия в уровнях иммобилизации *Daphnia magna* в ответ на воздействие катионов различных тяжелых металлов. Результаты исследования вносят вклад в оценку токсических эффектов катионов тяжелых металлов на *Daphnia magna*, подчеркивая важность мониторинга и контроля загрязнения тяжелыми металлами в водной среде.

The exposure of aquatic organisms to heavy metals is a matter of significant environmental concern due to its potential impact on ecosystems and human health. In this study, the acute immobilization toxicity of *Daphnia magna* in response to exposure to heavy metal cations, including copper (Cu^{2+}), cadmium (Cd^{2+}), lead (Pb^{2+}), and nickel (Ni^{2+}), was investigated. The study aimed to assess the effects of these heavy metal cations on the mobility and immobilization of *Daphnia magna*, providing valuable insights into the potential risks associated with heavy metal contamination in aquatic environments. The study utilized dilutions of standard aqueous solutions of the heavy metal cations, with artificial fresh water used as a control medium. The acute toxicity test involved exposing *Daphnia magna* individuals to the test solutions and assessing the immobilization effects after 48 hours of exposure. The effects were quantified as the average percentage of organism immobilization, with statistical analysis and model parameter assessment conducted to determine the toxicity levels of each heavy metal cation. The results revealed significant differences in the immobilization levels of *Daphnia magna* in response to exposure to different heavy metal cations. The study findings shed light on the varying toxic effects of heavy metal cations on *Daphnia magna*, highlighting the importance of monitoring and controlling heavy metal contamination in aquatic environments.

Ключевые слова: гидробионты, биоиндикация, токсичность, экологический мониторинг, угнетение подвижности.

Keywords: hydrobionts, bioindication, toxicity, environmental monitoring, specific growth rate.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2024-2-23-26>

Токсичность ионов металлов по отношению к водным организмам изучается на протяжении многих десятилетий, но понимание того, как ионы различных металлов, присутствующие в водных системах, вызывают токсичность, остается недостаточным. Отсутствие точного понимания механизмов действия затрудняет количественный прогноз токсичности ионов металлов как по отдельности, так и в различных сочетаниях. Промышленные сточные воды обычно содержат смесь токсичных и вредных веществ, которые могут оказывать неблагоприятное воздействие на здоровье человека и водные экосистемы. Ежегодно большое количество сточных вод, содержащих тяжелые металлы, сбрасывают предприятия автомобильной, горнодобывающей и металлургической промышленности. Они могут внести существенный вклад в экологический риск и загрязнение принимающей водной системы. Эти загрязнители вызывают экологические проблемы из-за своей высокой токсичности даже при низких концентрациях, поэтому наличие металлов (Cr, Ni, Fe, Cu) в таких сточных водах необходимо строго контролировать. Тяжелые металлы являются токсичны и обычно не удаляются обычными методами очистки сточных вод. Они не подвергаются биологическому разложению в окружающей среде, а это означает, что даже низкие концентрации могут оказать серьезное неблагоприятное воздействие на человека, наземные организмы и водную жизнь. Острое воздействие некоторых тяжелых металлов на животных и окружающую среду может включать тошноту, рвоту, поражение почек и печени, раздражение кожи и рак легких.

В настоящее время подходы биоиндикации считаются важными инструментами оценки негативных последствий и предотвращения деградации окружающей среды. Одним из наиболее широко используемых биоиндикаторных тестов для мониторинга токсичности водных ресурсов является тест на острую токсичность, проводимый с *Daphnia magna*. Этот тест стандартизирован, относительно прост в выполнении и в то же время экологически значим.

Обоснованием его использования является широкий спектр местообитаний, в которых могут обитать дафнии, их относительно короткий жизненный цикл, небольшие размеры, высокая чувствительность к загрязнению окружающей среды, а также возможность легкого культивирования в лабораторных условиях. Доказанная эффективность тестов с использованием дафнии привела к стандартизации процедур тестирования несколькими национальными и международными экологическими организациями. В Республике Беларусь дафнию магну также рекомендуют использовать в качестве биоиндикатора при испытаниях на токсичность. Дафнии подвергаются воздействию исследуемого экотоксиканта, добавленного в воду в разных концентрациях, в течение 24 или 48 часов. В тестах используется статичная система, в которой растворы не заменяются во время воздействия. Под воздействием стрессовых факторов окружающей среды у дафний наблюдается значительное снижение воспроизводства, нарушение вертикальной мобильности и моделей поведения и, в конечном итоге, фенотипические изменения.

К настоящему времени накоплен значительный объем данных, особенно по индивидуальным соединениям (отдельным ионам металлов). Однако исследований с использованием смесей ионов разных металлов было проведено меньше, несмотря на важность таких исследований с практической точки зрения, учитывая

потенциальные взаимодействия между различными металлами. Это может привести к уменьшению или увеличению диапазона безопасных для живых организмов концентраций в смесях металлов по сравнению с диапазонами для отдельных элементов.

В данном исследовании проведена оценка экотоксичности катионов тяжелых металлов, таких как медь (Cu^{2+}), кадмий (Cd^{2+}), свинец (Pb^{2+}) и никель (Ni^{2+}) с использованием тестового объекта *Daphnia magna*. Целью исследования являлась характеристика влияния катионов тяжелых металлов на подвижность и иммобилизацию *Daphnia magna*, что вносит вклад в понимание и оценку потенциальных рисков загрязнения водных сред тяжелыми металлами.

В ходе исследования использовались разведения стандартных водных растворов катионов тяжелых металлов, а искусственная пресная вода служила контрольной средой. Остротоксичный тест включал выдержку особей *Daphnia magna* в тестируемых растворах и оценку эффектов иммобилизации после 48-часового воздействия. Результаты были количественно оценены в виде среднего процента иммобилизации организмов, а также проведен статистический анализ и оценка параметров модели для определения уровня токсичности каждого катиона тяжелых металлов.

Количество иммобилизованных организмов – основной параметр, используемый при тестировании воды на токсичность с использованием *Daphnia magna*, при этом рекомендуемая продолжительность воздействия – 48 часов. Результаты исследований приведены на рисунке.

Как видно из данных, представленных на рисунке, катионы кадмия и меди оказывали более выраженный эффект на двигательную активность рачков дафний. Так, уже при концентрации ионов 0,05 мг/л наблюдалось иммобилизация $26,6 \pm 1,5$ % организмов модельного объекта в случае ионов кадмия и $19,6 \pm 1,4$ % – в случае ионов меди. Для катионов Pb^{2+} и Ni^{2+} подобный эффект наблюдался при концентрациях 0,7 мг/л и 1,0 мг/л, соответственно.

Характер кривых изменения иммобилизации большой дафнии (*Daphnia magna*) в области исследованных концентраций свидетельствует о том, что эффективность угнетения двигательной активности особей большой дафнии снижается в ряду $\text{Cu}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Ni}^{2+}$, что подтверждается рассчитанными значениями EC_{50} : $\text{EC}_{50} \text{Cu}^{2+}$ (0,11 мг/л) $\approx \text{EC}_{50} \text{Cd}^{2+}$ (0,14 мг/л) $< \text{EC}_{50} \text{Pb}^{2+}$ (1,41 мг/л) $< \text{EC}_{50} \text{Ni}^{2+}$ (2,84 мг/л).

Для построения аналитических моделей доза-эффект в настоящей работе использована лог-логистическая модель с четырьмя параметрами (b, c, d, e) LL.4 библиотеки *drm* в среде статистических вычислений R (GraphPad Software, Inc.), которая имеет вид:

$$\varphi(x) = c + \frac{d-c}{1 + e^{b(\log \log x - \log \log e)}},$$

где c и d – параметры, определяющие нижнюю и верхнюю горизонтальные асимптоты сигмоидной кривой,

e – соответствует положению точки перегиба,

b – соответствует коэффициенту угла наклона в области переходного состояния.

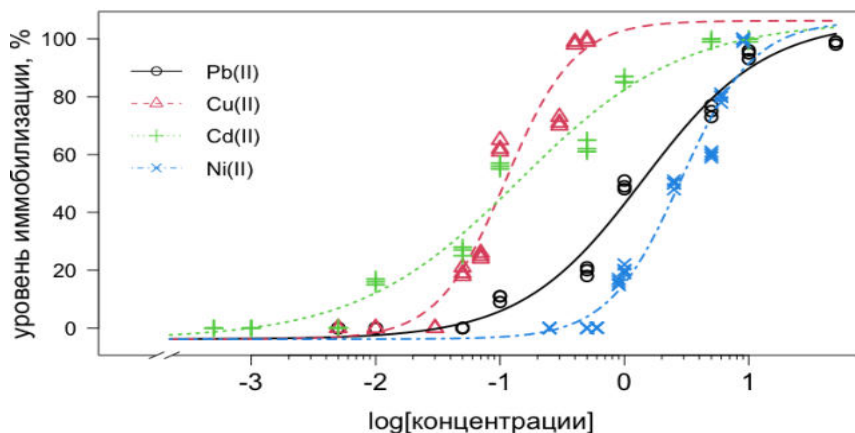


Рисунок – Уровень иммобилизации больших дафний (*Daphnia magna*) в зависимости от концентрации изученных катионов по итогам 48-часового культивирования после воздействия

Показано, что зависимость уровня иммобилизации *Daphnia magna* от концентрации катионов через 48 часов описываются уравнениями:

1) для иона Cu^{2+} :

$$\text{уровень иммобилизации} = -3,8 + \frac{106,3 + 3,8}{1 + e^{-1,6 \cdot C(\text{мг/л}) - \log \log 0,11}}$$

2) для катиона Cd^{2+} :

$$\text{уровень иммобилизации} = -3,8 + \frac{106,3 + 3,8}{1 + e^{-0,7 \cdot C(\text{мг/л}) - \log \log 0,14}}$$

3) для иона Pb^{2+} :

$$\text{уровень иммобилизации} = -3,8 + \frac{106,3 + 3,8}{1 + e^{-0,9 \cdot C(\text{мг/л}) - \log \log 1,41}}$$

4) для катиона Ni^{2+} :

$$\text{уровень иммобилизации} = -3,8 + \frac{106,3 + 3,8}{1 + e^{-1,5 \cdot C(\text{мг/л}) - \log \log 2,84}}$$

Кроме того, установлено, что коэффициенты наклона (b), верхнего и нижнего пределов (c и d), а также значения EC_{50} статистически значимы для всех изученных катионов.

Токсикологическое изучение тяжелых металлов и их влияния на *Daphnia magna* имеет первостепенное значение для понимания последствий загрязнения окружающей среды на водные экосистемы. Источники тяжелых металлов в водных средах разнообразны и могут происходить как из естественных, так и антропогенных источников. Промышленные сбросы, городская канализация, горнодобывающие операции и сельскохозяйственная деятельность являются основными источниками загрязнения воды тяжелыми металлами. Эти виды деятельности могут привести к выбросу тяжелых металлов, таких как цинк, свинец, медь, кадмий и хром, в водные экосистемы, создавая значительную угрозу для организмов, обитающих в этих средах, включая *Daphnia magna* [1,2].

Daphnia magna, часто называемая водным блошкой, широко используется в экотоксикологии из-за ее чувствительности к различным факторам внешней среды, включая тяжелые металлы. Этот крошечный ракообразный играет ключевую роль в пищевой цепи пресноводных экосистем и служит важным индикатором для оценки здоровья водных сред. Понимание токсических эффектов тяжелых металлов на *Daphnia magna* критически важно для оценки потенциальных рисков, связанных с загрязнением металлами, и для разработки регуляторных мер, направленных на защиту водных экосистем.

Многочисленные исследования продемонстрировали восприимчивость *Daphnia magna* к воздействию тяжелых металлов [3,4]. Например, исследования показали, что кадмий, высокотоксичный тяжелый металл, может оказывать негативное влияние на выживаемость, рост и размножение *Daphnia magna*. Исследование, направленное на изучение восприимчивости партогенетических яиц *Daphnia magna* к кадмию, цинку, меди и свинцу, показало, что эти тяжелые металлы могут значительно влиять на ранние стадии развития организма. Аналогично цинк, медь и свинец также оказывают токсическое воздействие на *Daphnia magna*, подчеркивая уязвимость этого вида к различным тяжелым металлам.

Помимо индивидуальной токсичности металлов, исследования также изучали сравнительную токсичность различных тяжелых металлов для *Daphnia magna*. Например, 48-часовая LC_{50} тяжелых металлов продемонстрировала убывающий порядок токсичности следующим образом: $\text{Hg} > \text{Ag} > \text{Cr} > \text{Zn} > \text{Co} > \text{Cu} > \text{Cd} > \text{Pb} > \text{Sn} > \text{Si}$. Эти результаты предоставляют ценную информацию о различной степени токсичности различных тяжелых металлов, что важно для определения приоритетов в управлении загрязнением водных экосистем тяжелыми металлами.

В заключение, токсикологическое изучение тяжелых металлов и их влияния на *Daphnia magna* является критически важной областью исследований с далеко идущими последствиями для охраны окружающей среды. Путем оценки токсических эффектов тяжелых металлов на *Daphnia magna* ученые и законодатели могут принимать обоснованные решения по смягчению воздействия загрязнения металлами на водные экосистемы. Кроме того, чувствительность *Daphnia magna* к тяжелым металлам подчеркивает ее важность в качестве биоиндикатора для мониторинга качества окружающей среды и подчеркивает необходимость проведения дальнейших исследований для продвижения нашего понимания взаимодействия тяжелых металлов и водных организмов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Paylar B, Asnake S, Sjöberg V и др. Influence of water hardness on zinc toxicity in *Daphnia magna* // J Appl Toxicol. 2022. Vol. 42, № 9. P. 1510–1523.
2. Yuan N, Pei Y, Bao A, Wang C. The Physiological and Biochemical Responses of *Daphnia magna* to Dewatered Drinking Water Treatment Residue // Int J Environ Res Public Health. 2020. Vol. 17, № 16. P. 5863.
3. Okamoto A, Yamamuro M, Tatarazako N. Acute toxicity of 50 metals to *Daphnia magna* // J Appl Toxicol. 2014. Vol. 35. P. 824–830.
4. Okamoto A., Yamamuro M., Tatarazako N. Acute toxicity of 50 metals to *Daphnia magna* / A. Okamoto, M. Yamamuro, N. Tatarazako // J. Appl. Toxicol. - 2015. - Vol. 35, no. 7. - P. 824–830.