ЭКОБИОТЕХ
ISSN 2618-964X http://ecobiotech-journal.ru
УДК 504.064.2:574.64 UDC 504.064.2:574.64

# Токсичность катионов тяжелых металлов и их смесей для *Lemna minor* и *Daphnia magna* в контексте оценки экологических рисков

***Сыса А.Г.*, Живицкая Е.П., Кравченя Н.И.***
Белорусский государственный университет,
МГЭИ им. А.Д. Сахарова БГУ, Минск, Республика Беларусь
*E-mail: aliaksei.sysa@iseu.by

***Аннотация***
В работе проведен сравнительный анализ влияния катионов тяжелых металлов ($Cu^{2+}$, $Fe^{2+}$, $Pb^{2+}$, $Zn^{2+}$, $Cd^{2+}$, $Ni^{2+}$) и их бинарных смесей на ряску (*Lemna minor*) и дафнию (*Daphnia magna*). Использованы стандартизированные методы биотестирования с концентрациями в кратных ПДК.
Для *L. minor* наибольшую токсичность проявил кадмий ($ED_{50}$ = 0.25 мл/л), наименьшую – никель ($ED_{50}$ = 5.0 мг/л). Для *D. magna* наиболее токсичной оказалась медь ($ED_{50}$ = 0,11 мг/л), наименее – никель ($ED_{50}$ = 5.0 мг/л). Анализ бинарных смесей выявил синергизм (CI < 1) в низких концентрациях (1-10 ПДК) и преобладание антагонизма (CI > 1) при высоких (100–1000 ПДК). Двигательная активность *D. magna* оказалась высоко чувствительной к сублетальным дозам металлов и может использоваться для ранней диагностики токсичности. Полученные данные подтверждают видовые различия в чувствительности и подчеркивают необходимость комплексного подхода к оценке экологических рисков при загрязнении водоемов тяжелыми металлами и их смесями.

***Ключевые слова***
гидробионты ◆ биотестирование ◆ токсичность ◆ тяжелые металлы ◆ синергизм ◆ антагонизм ◆ экологический мониторинг ◆ удельная скорость роста ◆ иммобилизация

# Toxicity of heavy metal cations and their mixtures to *Lemna minor* and *Daphnia magna* in the context of ecological risk assessment

***Sysa A.G.*, Zhyvitskaya E.P., Krauchenia N.I.***
Belarusian State University, ISEI BSU,
Minsk, Republic of Belarus
*E-mail: aliaksei.sysa@iseu.by

***Abstract***
This study examines the effects of heavy metal cations ($Cu^{2+}$, $Fe^{2+}$, $Pb^{2+}$, $Zn^{2+}$, $Cd^{2+}$, $Ni^{2+}$) and their binary mixes on lesser duckweed *(Lemna minor*) and *Daphnia magna*. Standardized bioassay methods with concentrations that are multiples of the maximum permissible concentrations (MPC) are used.
Cadmium was the most harmful to *L. minor* ($ED_{50}$ = 0.25 mg/L), whereas nickel was the least hazardous ($ED_{50}$ = 5.0 mg/L). Copper was most harmful to *D. magna* ($ED_{50}$ = 0.11 mg/L), whereas nickel was the least toxic ($ED_{50}$ = 5.0 mg/L). Binary mixture analysis showed synergy (CI < 1) at low concentrations (1-10 MPC) and antagonism (CI > 1) at high concentrations (100–1000 MPC), which were linked to increased oxidative stress and competition for binding sites. *Daphnia magna* locomotor activity demonstrated to be a sensitive indicator of sublethal metal exposure and is appropriate for early toxicity diagnosis. The results validate species-specific sensitivity variations and highlight the significance of an integrated approach to ecological risk assessment in aquatic environments contaminated with heavy metals and combinations

***Keywords***
hydrobionts ◆ biotesting ◆ toxicity ◆ heavy metals ◆ synergism ◆ antagonism ◆ environmental monitoring ◆ specific growth rate ◆ immobilization

*Поступила в редакцию: 15.07.2025* *Received: 15.07.2025*
*Принято в печать: 01.10.2025* *Accepted: 01.10.2025*
Цитировать | Cite as

DOI: 10.31163/2618-964X/2025-34 EDN: XCMGUR

## ВВЕДЕНИЕ

Обусловленное антропогенной деятельностью (включая промышленные сбросы, сельское хозяйство и урбанизацию) загрязнение водоемов тяжелыми металлами представляет собой одну из ключевых экологических проблем [Duruibe *et al*., 2007, Verstijnen *et al*., 2024]. Тяжелые металлы (такие как медь, свинец, цинк и пр.) обладают высокой токсичностью, способностью к биоаккумуляции и устойчивостью в окружающей среде, что делает их опасными для водных экосистем [Sasmaz *et al*., 2015].

Для оценки экологических рисков и мониторинга состояния водоемов широко применяются методы биотестирования, основанные на использовании тест-объектов, таких как ряска малая (*Lemna minor*) и большая дафния (*Daphnia magna*) [Neidoni *et al*., 2018, Lampert, 2011].

Ряска малая – водное макрофитное растение, обладающее высокой чувствительностью к загрязнителям, способностью к быстрому росту и легкостью культивирования в лабораторных условиях [Luhana, 2022]. Большая дафния — планктонный рачок, широко используемый в токсикологических тестах благодаря короткому жизненному циклу, высокой чувствительности к токсикантам и стандартизированным методикам оценки [Lampert, 2011].

Несмотря на значительное количество исследований, посвященных влиянию отдельных катионов тяжелых металлов на гидробионты [Hagopian-Schlekat *et al*., 2001], данные о совместном действии их в смесях остаются ограниченными, хотя именно смеси металлов чаще встречаются в реальных условиях загрязнения [Kou *et al*., 2024]. Взаимодействие катионов в смесях может приводить к синергетическим (усиление токсичности), антагонистическим (ослабление токсичности) или аддитивным эффектам, что существенно влияет на экологические риски [Vijver *et al*., 2011]. Для количественной оценки таких взаимодействий применяются различные подходы, включая расчет индекса комбинированной токсичности (CI), который позволяет определить отклонения от аддитивности [Лошадкин *и др*., 2002].

Целью настоящего исследования является сравнительный анализ влияния отдельных катионов тяжелых металлов ($Cu^{2+}$, $Fe^{2+}$, $Pb^{2+}$, $Zn^{2+}$, $Cd^{2+}$, $Ni^{2+}$) и их бинарных смесей на морфо-физиологические показатели *L. minor* и *D. magna*, а также оценка синергетических и антагонистических эффектов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Объекты исследования

Растения ряски малой были собраны в период с 31.05.2024 по 15.06.2024 из Волковичского водохранилища (окрестности г. Минска, Республика Беларусь). Культуры *Daphnia magna* были выделены из естественной популяции, собранной в мелководном эвтрофном пруду в пойме реки Свислочь (окрестности г. Минска, Республика Беларусь). Виды определены по морфологическим признакам.

После сбора все организмы проходили обязательный этап акклиматизации в лабораторных условиях. Для ряски акклиматизация проводилась в течение 10 суток в дехлорированной водопроводной воде при температуре 24 °C, освещенности 1000 лк и 11-часовом световом дне, что полностью соответствовало условиям последующих экспериментов. Для *D. magna* акклиматизация осуществлялась в течение 7 суток в искусственной пресной воде (состав идентичен экспериментальному), при температуре 20 ± 1 °C и стандартном световом режиме. В течение этого времени осуществлялся ежедневный контроль состояния организмов, удаление погибших особей и поддержание стабильных параметров среды.

### Условия экспериментов

Для *L. minor* испытания проводили согласно [ГОСТ 32426-2013]. Растения культивировали в цилиндрических сосудах объемом 250 мл, содержащих 100 мл дехлорированной водопроводной воды, при температуре 24 °C, освещенности 1000 лк

и 11-часовом световом дне. В каждый сосуд помещали 10 растений с одной развитой и одной развивающейся лопастью.

Для *D. magna* проводили 48-часовой тест на острую иммобилизационную токсичность. Использовали искусственную пресную воду (pH 7.0±0.1), приготовленную с добавлением KCl (1.2 мг/л), $NaHCO_3$ (13.0 мг/л), $MgSO_4*7H_2O$ (24.7 мг/л) и $CaCl_2*2H_2O$ (58.5 мг/л).

Для оценки двигательной активности *D. magna* использовали экспресс-метод, основанный на подсчете количества пересечений условных линий в течение 5 мин [Олькова *и др.*, 2017].

**Тестируемые вещества**

Использовали растворы солей: $CuSO_4*5H_2O$, $FeSO_4*3H_2O$, $Pb(CH_3COO)_2*3H_2O$, $ZnCl_2*3H_2O$, $CdCl_2$, $NiCl_2$. Концентрации катионов подбирали с учетом нормативов: предельно допустимых концентраций (ПДК) для качества воды поверхностных водных объектов, используемых для размножения, нагула, зимовки, миграции видов рыб отрядов лососеобразных и осетрообразных, а также иных поверхностных водных объектов [ЭкоНиП 17.06.01-006-2023]: $Cu^{2+}$ – 0.0035 мг/л; $Fe^{2+}$ – 0.005 мг/л; $Pb^{2+}$ – 0,014 мг/л; $Zn^{2+}$ – 0.01 мг/л; $Cd^{2+}$ – 0.005 мг/л; $Ni^{2+}$ – 0.034 мг/л. Для каждого катиона тестировали уровни 1, 10, 100 ПДК – витальные дозы, 1000 и 10000 ПДК – летальные дозы.

Бинарные смеси готовили, комбинируя первый катион в концентрации равной расчетному значению $ED_{50}$ (эффективная доза – содержание катиона, при котором достигается 50%-ный эффект), а второй – в концентрациях 1-10000 ПДК.

**Оценка токсичности**

Для оценки токсичности использовали стандартизированные методы биотестирования, адаптированные для *L. minor* и *D. magna*, с учетом как летальных, так и сублетальных эффектов.

**Оценка токсичности по отношению к *Lemna minor***

Токсичность по отношению к *L. minor* оценивали по удельной скорости роста (μ), которую рассчитывали по формуле:

$$\mu_{(i-j)} = (\ln N_j - \ln N_i) / t,$$

где $N_j$ и $N_i$ — количество фрондов в момент времени j и i, t — период времени (7 дней).

Эксперимент проводили в трех повторностях для каждого разведения (1, 10, 100, 1000 и 10000 ПДК) и шести повторностях для контроля.

**Оценка токсичности по отношению к *Daphnia magna***

Токсичность по отношению к *D. magna* оценивали по двум показателям: подвижности (летальный эффект) и двигательной активности (сублетальный эффект).

Подвижность определяли после 48 часов воздействия тестируемой среды. Для этого в каждую повторность помещали 5 особей *D. magna* возрастом менее 24 часов в 10 мл искусственной пресной воды с добавлением тестируемых веществ. Эксперимент проводили в трех повторностях для каждого разведения и шести повторностях для контроля.

Через 48 часов сосуды аккуратно встряхивали вручную в течение 5 с, после чего визуально оценивали подвижность каждой особи с помощью стереомикроскопа Olympus SZ61 при увеличении $10^x$. Организмы считались неподвижными (иммобилизованными),

если не могли плыть вперед в течение 15 с после встряхивания, даже если наблюдались движения усиков ил*и д*ругих придатков.

Подвижность рассчитывали по формуле:

$$\text{Подвижность (\%)} = (N_{подв} / N_{общ}) \times 100,$$

где $N_{подв}$ — число подвижных особей, $N_{общ}$ — общее число особей в повторности.

Тест считался валидным, если подвижность в контрольных группах была выше 90%.

Двигательную активность *D. magna* измеряли как количество пересечений условных линий (к.п.л.) в течение 5 мин. Метод основан на визуальном подсчете пересечений рачком линий наблюдаемого поля зрения.

Для эксперимента в три химических стакана объемом 50 мл с 50 мл тестируемой среды помещали по 3 рачка *D. magna* возрастом менее 24 часов. Рачки предварительно отбирались из лабораторной культуры, выращенной в стандартных условиях (температура 20±1°C, освещенность 1000 лк, 16-часовой световой день, искусственная пресная вода с pH 7.0±0.1).

Далее через 1 ч экспозиции в тестируемой среде каждую дафнию поочередно перемещали в емкость для измерений – узкий высокий химический стакан объемом 50 мл, содержащий 15 мл той же тестируемой среды. Перемещение осуществляли с помощью ширококонечной пипетки для минимизации стресса.

Для измерения двигательной активности использовали палетку с нанесенной сеткой ячеек размером 5*5 мм, изготовленную из прозрачного пластика. Палетку размещали под дном стакана, обеспечивая четкую видимость линий через прозрачное стекло. Наблюдения проводили с помощью стереомикроскопа Olympus SZ61 при увеличении $10^x$ или визуально при хорошем освещении (не менее 1000 лк).

Количественную оценку двигательной активности производили путем подсчета количества пересечений рачком условных линий сетки в течение 5 мин. Пересечением считалось пересечение линии любой частью тела рачка (включая антенны). Подсчет проводили для каждой дафнии отдельно, что обеспечивало 9 измерений на каждую тестируемую среду (3 рачка * 3 повторности).

После учета двигательной активности дафний возвращали в исходные опытные емкости для продолжения эксперимента, используя ту же ширококонечную пипетку.

Измерения повторяли через 24 ч для оценки динамики токсического процесса.

**Статистический анализ**

Полученные данные обрабатывали методами математической статистики: вычисляли средние значения, стандартные отклонения и применяли t-критерий Стьюдента для установления значимых различий с контролем ($p<0.05$).

Для построения моделей «доза-эффект» использовали лог-логистическую модель с четырьмя параметрами (LL.4) в среде R (GraphPad Software, Inc.):

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

где c и d — нижняя и верхняя асимптоты, e — точка перегиба ($ED_{50}$), b — коэффициент наклона. Статистическую значимость параметров оценивали с помощью t-критерия Стьюдента ($p < 0.05$).

Для оценки комбинированных эффектов бинарных смесей рассчитывали индекс комбинированной токсичности (CI) по методу Чоу и Талай [Chou, 2010]:

$$CI = (C_1 / ED_{50}^1) + (C_2 / ED_{50}^2),$$

где $C_1$ и $C_2$ — концентрации катионов в смеси, вызывающие 50% эффект, $ED_{50}^1$ и $ED_{50}^2$ — их индивидуальные $ED_{50}$.

Интерпретация CI: CI < 1 — синергизм, CI = 1 – аддитивность, CI > 1 – антагонизм.

Для сравнения чувствительности видов рассчитывали коэффициент токсичности (КТ) как отношение $ED_{50}$ одного вида к другому:

$$КТ = ED_{50}(L.\ minor) / ED_{50}(D.\ magna).$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты анализа токсичности отдельных катионов по отношению к *L. minor* и *D. magna* (подвижность) представлены в табл. 1.

**Таблица 1. Оценка токсичности отдельных катионов тяжелых металлов для *Lemna minor* и *Daphnia magna***

| Катион | $ED_{50}$(*L. minor*), мг/л | $ED_{50}$(*D. magna*), мг/л | КТ |
|---|---|---|---|
| $Cu^{2+}$ | 2.54 ± 0.62 | 0.11 ± 0.01 | 23.1 |
| $Fe^{2+}$ | 1.24 ± 0.22 | 1.00 ± 0.15 | 1.24 |
| $Pb^{2+}$ | 0.66 ± 0.17 | 1.41 ± 0.21 | 0.47 |
| $Zn^{2+}$ | 0.40 ± 0.07 | 0.50 ± 0.06 | 0.80 |
| $Cd^{2+}$ | 0.25 ± 0.04 | 0.20 ± 0.04 | 1.25 |
| $Ni^{2+}$ | 5.00 ± 1.03 | 5.00 ± 0.40 | 1.00 |

Для *L. minor* наиболее токсичным оказался $Cd^{2+}$ ($ED_{50}$ = 0.25 мг/л), наименее – $Ni^{2+}$ ($ED_{50}$ = 5.00 мг/л). Ряд токсичности: $Cd^{2+} > Zn^{2+} > Pb^{2+} > Fe^{2+} > Cu^{2+} > Ni^{2+}$. Для *D. magna* максимальную токсичность проявил $Cu^{2+}$ ($ED_{50}$ = 0.11 мг/л), минимальную – $Ni^{2+}$ ($ED_{50}$ = 5.00 мг/л). Ряд токсичности: $Cu^{2+} > Cd^{2+} > Zn^{2+} > Fe^{2+} > Pb^{2+} > Ni^{2+}$.

Сравнительный анализ чувствительности видов с использованием КТ показал, что *D. magna* в 23.1 раза чувствительнее к меди, чем *L. minor*; напротив, ряска оказалась в 2.1 раза чувствительнее к свинцу.

Динамика токсических эффектов представлена на рисунке 1. Для *L. minor* в концентрациях 0.0035-0.035 мг/л $Cu^{2+}$ и 0.005-0.05 мг/л $Fe^{2+}$ не оказывали значимого влияния на рост (15-17.5%-ное ингибирование), для $Ni^{2+}$ (0.034-0.34 мг/л) установлено 33%-ное снижение скорости роста, тогда как $Zn^{2+}$ (0.01-0.1 мг/л), $Pb^{2+}$ (0.014-0.14 мг/л) и $Cd^{2+}$ (0.005-0.05 мг/л) вызывали ингибирование на 66.7%, 60% и 50%, соответственно. Для *D. magna* уже при 0.035 мг/л $Cu^{2+}$ и 0.05 мг/л $Cd^{2+}$ наблюдалась иммобилизация 19.6%

и 26.6% особей, соответственно. При последующем росте концентраций катионов тяжёлых металлов до 0.35 мг/л медь, кадмий и цинк снижали число подвижных особей более чем на 50%, свинец, никель и железо приводили к снижению подвижности на 37-47%.

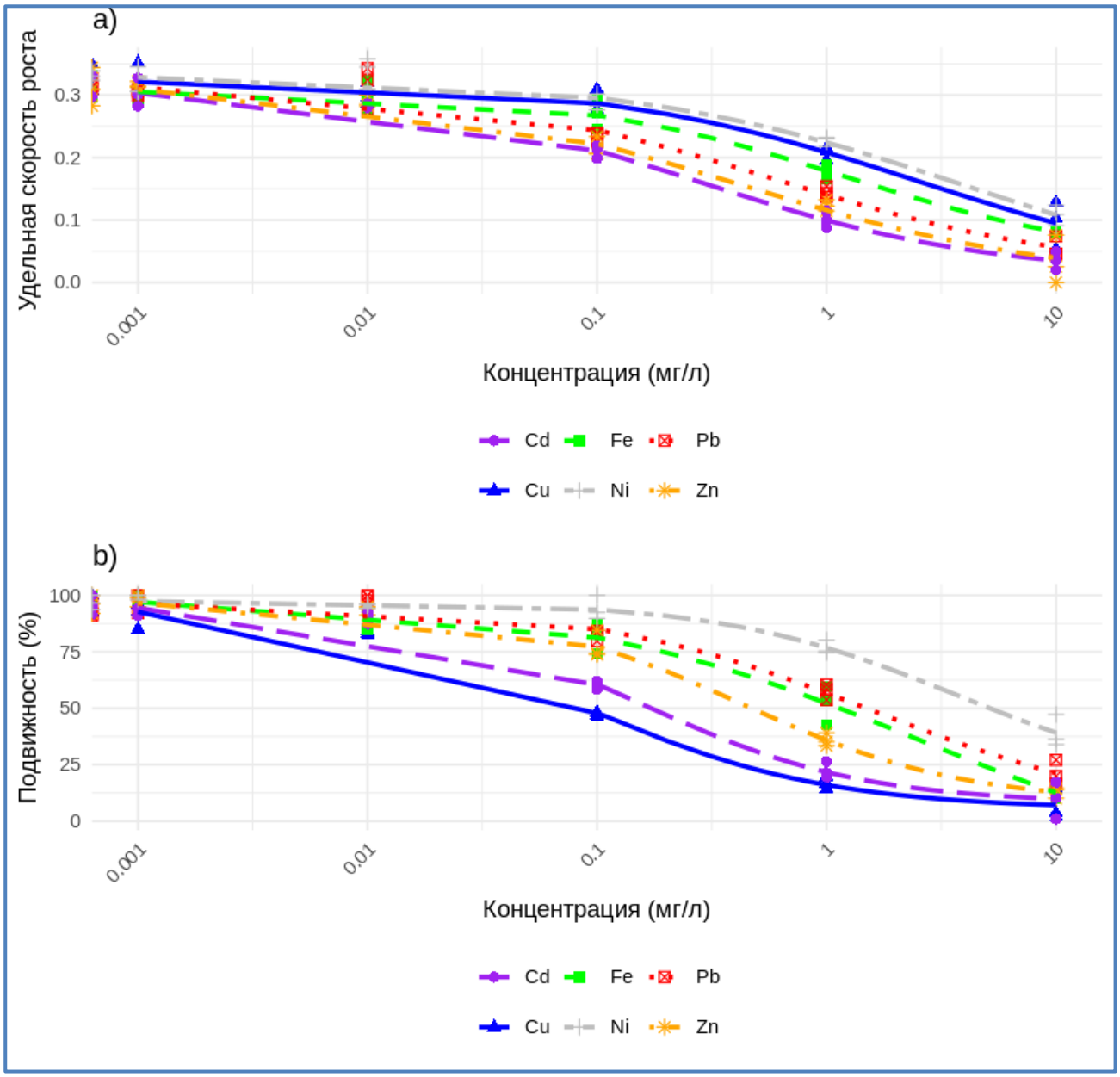


**Рисунок 1. Токсический эффект различных доз катионов тяжелых металлов на *Lemna minor* (a) и *Daphnia magna* (b):**

a) Удельная скорость роста *L. minor* в зависимости от концентрации катионов после 7 дней культивирования.
b) Уровень иммобилизации *D. magna* в зависимости от концентрации катионов после 48 часов воздействия.

Сравнительный анализ чувствительности видов с использованием КТ (табл. 1), а также анализ кривых «доза-эффект» (рисунок 1) позволяет установить значительные межвидовые различия. Так, *D. magna* в 20 раз чувствительнее к меди. В свою очередь, *L. minor* более чувствительна к $Zn^{2+}$ и $Pb^{2+}$. Парный t-тест для сравнения $ED_{50}$ по общим катионам ($Cu^{2+}$, $Pb^{2+}$) показал статистически значимые различия ($p < 0.01$) в чувствительности к $Cu^{2+}$ (t = 5.82) и $Pb^{2+}$ (t = 3.45).

Эксперименты с *D. magna* показали, что двигательная активность является более чувствительным индикатором токсичности, чем иммобилизация. Результаты для всех катионов в абсолютных концентрациях представлены на рисунке 2.

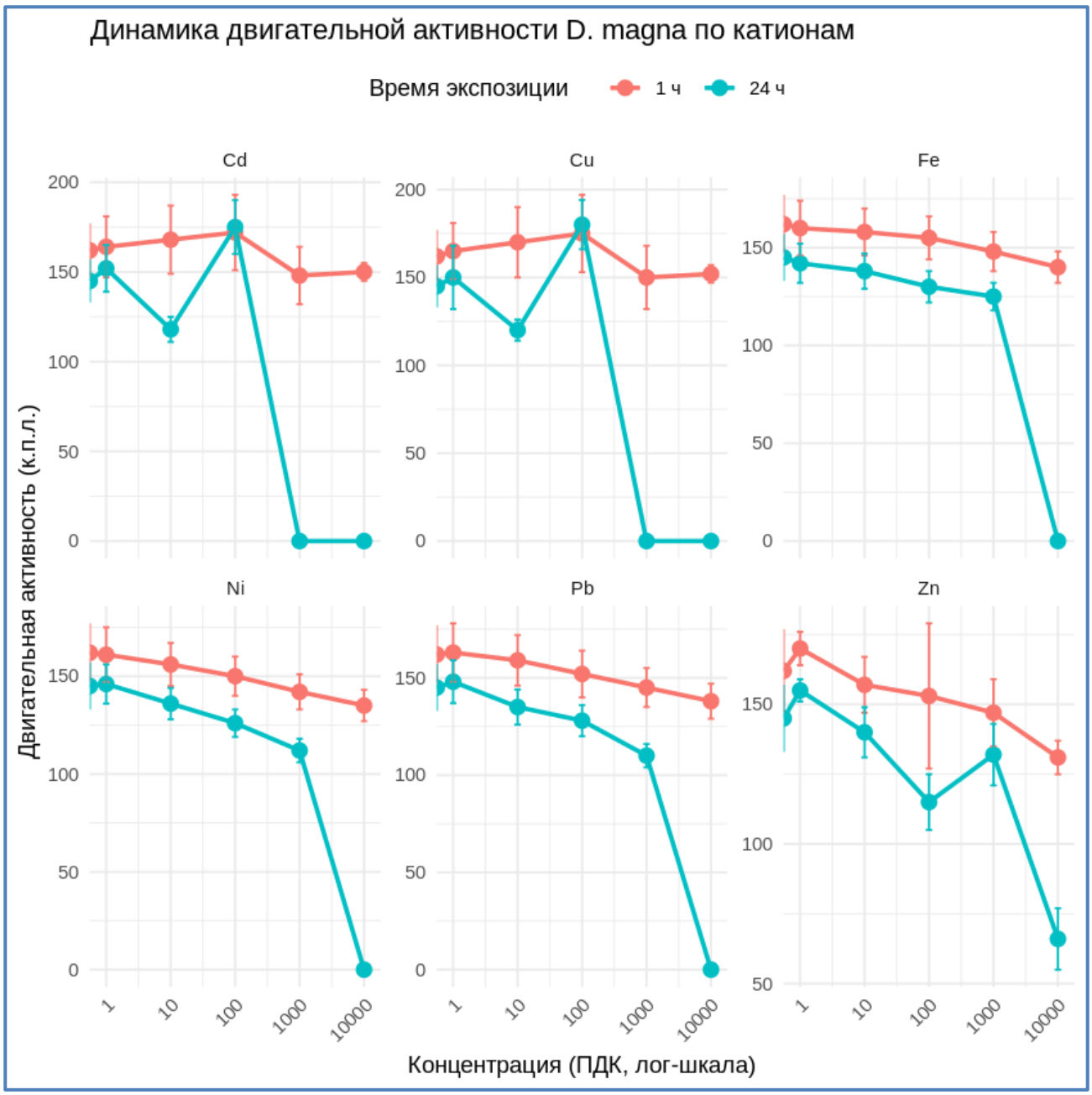


**Рисунок 2. Динамика двигательной активности *D. magna* в зависимости от катионов тяжелых металлов.**

Витальные дозы (1–10 ПДК) катионов $Cu^{2+}$ и $Cd^{2+}$ через 1 ч экспозиции вызывали повышение двигательной активности. Через 24 ч при 10 ПДК наблюдалось угнетение ($p < 0.05$). Летальные дозы (1000–10000 ПДК) вызывали угнетение уже через 1 ч, предшествуя гибели. Для $Zn^{2+}$, $Pb^{2+}$ и $Ni^{2+}$ тенденции аналогичны, но с более плавным угнетением; для катионов $Fe^{2+}$ установлена наименьшая токсичность.

Для *D. magna* изучены эффекты смесей $Cu^{2+}$ ($ED_{50}$ = 0.11 мг/л) и $Ni^{2+}$ ($ED_{50}$ = 5 мг/л) в комбинациях с другими катионами (табл. 2). Смеси $Cu^{2+}$ с $Pb^{2+}$ и $Cd^{2+}$ в области низких концентраций (0.0035-0.035 мг/л) проявляли синергизм (CI < 1), а в области высоких (0.35-3.5 мг/л) – антагонизм (CI > 1). Для смесей $Cu^{2+}$ с $Ni^{2+}$ показан антагонизм во всем диапазоне концентраций (CI > 1). Смеси $Ni^{2+}$ с $Cu^{2+}$, $Cd^{2+}$ и $Pb^{2+}$ проявляли синергизм (CI < 1), причем токсичность снижалась в ряду Cd+Ni > Cu+Ni > Pb+Ni.

**Таблица 2. Эффекты воздействия бинарных смесей катионов тяжелых металлов на *Daphnia magna***

| Смесь | CI (низкие концентрации, 1-10 ПДК) | Тип взаимодействия | CI (высокие концентрации, 100-1000 ПДК) | Тип взаимодействия |
|---|---|---|---|---|
| $Cu^{2+}$ + $Pb^{2+}$ | 0.72 ± 0.08 | Синергизм | 1.45 ± 0.12 | Антагонизм |
| $Cu^{2+}$ + $Cd^{2+}$ | 0.65 ± 0.07 | Синергизм | 1.38 ± 0.10 | Антагонизм |
| $Cu^{2+}$ + $Ni^{2+}$ | 1.25 ± 0.09 | Антагонизм | 1.67 ± 0.14 | Антагонизм |
| $Ni^{2+}$ + $Cd^{2+}$ | 0.58 ± 0.06 | Синергизм | 0.75 ± 0.08 | Синергизм |
| $Ni^{2+}$ + $Cu^{2+}$ | 0.67 ± 0.07 | Синергизм | 0.82 ± 0.09 | Синергизм |
| $Ni^{2+}$ + $Pb^{2+}$ | 0.79 ± 0.08 | Синергизм | 0.91 ± 0.10 | Синергизм |

Для *L. minor* эффекты бинарных смесей оценивали в аналогичных кратных ПДК концентрациях (табл. 3). Конкретные комбинации металлов отобраны на основе их экологической значимости и предварительных данных о взаимодействиях, с приоритетом для пар, влияющих на фотосинтез и рост *L. minor*. Показано, что смеси $Cu^{2+}$ в комбинациях с $Pb^{2+}$ и $Zn^{2+}$ в области низких концентраций (1-10 ПДК) проявляли синергизм (CI < 1), усиливая ингибирование роста, а в области высоких (100–1000 ПДК) – антагонизм (CI > 1). Для смесей с $Fe^{2+}$ показан антагонизм в комбинациях с $Cu^{2+}$ и $Zn^{2+}$ (CI > 1).

**Таблица 3. Эффекты бинарных смесей катионов тяжелых металлов на *Lemna minor***

| Смесь | CI (низкие концентрации, 1-10 ПДК) | Тип взаимодействия | CI (высокие концентрации, 100-1000 ПДК) | Тип взаимодействия |
|---|---|---|---|---|
| $Cu^{2+}$ + $Pb^{2+}$ | 0.68 ± 0.07 | Синергизм | 1.52 ± 0.13 | Антагонизм |
| $Cu^{2+}$ + $Zn^{2+}$ | 0.62 ± 0.06 | Синергизм | 1.48 ± 0.12 | Антагонизм |
| $Cu^{2+}$ + $Fe^{2+}$ | 1.35 ± 0.10 | Антагонизм | 1.72 ± 0.15 | Антагонизм |
| $Fe^{2+}$ + $Zn^{2+}$ | 1.28 ± 0.09 | Антагонизм | 1.65 ± 0.14 | Антагонизм |
| $Fe^{2+}$ + $Pb^{2+}$ | 0.75 ± 0.08 | Синергизм | 0.88 ± 0.09 | Синергизм |
| $Zn^{2+}$ + $Pb^{2+}$ | 0.70 ± 0.07 | Синергизм | 0.85 ± 0.08 | Синергизм |

Сравнение CI проведено в рамках экспериментально установленных диапазонов ПДК, где первая компонента фиксирована на $ED_{50}$, а вторая варьируется, для обеспечения

сравнимости в условиях дозозависимости. Сравнительный анализ CI между видами показывает, что смеси с $Cu^{2+}$ проявляют более выраженный синергизм в отношении *D. magna* (CI = 0.65-0.72 против 0.62-0.68 для *L. minor*). Напротив, смеси с $Zn^{2+}$ или $Pb^{2+}$ проявляют более сильный синергизм в отношении *L. minor* (CI = 0.70 против 0.79 для *D. magna*).

## ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты подтверждают высокую токсичность катионов тяжелых металлов для тест-объектов *L. minor* и *D. magna*, что согласуется с данными предыдущих исследований [Живицкая *и др*., 2024]. Для отдельных катионов ряды токсичности различаются между видами: по отношению к *L. minor* наибольшую токсичность проявляет $Cd^{2+}$ ($ED_{50}$ = 0.25 мг/л), что может быть связано с его сильным влиянием на процессы фотосинтеза и аккумуляцию в тканях растений, приводящую к ингибированию роста [Vámos *et al*., 2024]. В то же время катионы $Ni^{2+}$ оказались наименее токсичными ($ED_{50}$ = 5.00 мг/л), вероятно, из-за более низкой биодоступности в условиях культивирования. По отношению к *D. magna*, напротив, $Cu^{2+}$ и $Cd^{2+}$ являются наиболее токсичнымv ($ED_{50}$ = 0.11 и 0.20 мг/л, соответственно) металлами в ряду изученных, что объясняется прямым воздействием на нервную систему и подвижность рачков [Шилова *и др*., 2010]. Такие видовые различия подчеркивают необходимость комплексного использования тест-объектов для адекватной оценки экологических рисков [Жмур, 2018].

Анализ бинарных смесей выявил сложные взаимодействия, включая синергизм и антагонизм, зависящие от концентраций. В области низких доз (1-10 ПДК) синергизм (CI < 1) для смесей $Cu^{2+}$ + $Pb^{2+}$ и $Cu^{2+}$ + $Cd^{2+}$ по отношению к *D. magna*, а также $Cu^{2+}$ + $Pb^{2+}$ и $Cu^{2+}$ + $Zn^{2+}$ по отношению к *L. minor*, вероятно, обусловлен усилением окислительного стресса и генерацией активных форм кислорода, что усиливает токсические эффекты [Гривенникова *и др*., 2013]. Данные результаты согласуется с работой [Скугорева *и др*., 2016], в которой показано, что комбинированное действие металлов приводит к повышенной проницаемости мембран и нарушению метаболизма. В высоких концентрациях (100-1000 ПДК) преобладает антагонизм (CI > 1), что может быть связано с конкуренцией катионов за сайты связывания в организмах, снижая их биодоступность [Pei *et al*., 2006]. Например, антагонизм в смесях $Cu^{2+}$ + $Ni^{2+}$ при воздействии на *D. magna* и $Cu^{2+}$ + $Fe^{2+}$ при воздействии на *L. minor* подтверждает гипотезу о конкурентном ингибировании. Сравнительный межвидовой анализ значений CI показывает, что *D. magna* более подвержена синергизму в смесях с $Cu^{2+}$, в то время как *L. minor* – в смесях с $Zn^{2+}$ и $Pb^{2+}$, что отражает различия в механизмах биоаккумуляции: растения накапливают металлы в тканях, а рачки – через жабры и пищевой тракт.

Значения коэффициентов токсичности (КТ) подчеркивают межвидовые различия: высокое значение КТ для $Cu^{2+}$ (23.1) указывает на большую чувствительность *D. magna*, что связано с нейротоксичностью меди [Шилова *и др*., 2010]. Напротив, низкое значение КТ для $Pb^{2+}$ (0.47) свидетельствует о повышенной уязвимости *L. minor*, вероятно, из-за нарушения фотосинтеза и роста [Liebers *et al*., 2023]. Парный *t*-тест подтверждает

значимость этих различий ($p < 0.01$), что согласуется с данными о видоспецифичных механизмах детоксикации.

Особое внимание заслуживает оценка двигательной активности *D. magna* как сублетального индикатора. Витальные дозы $Cu^{2+}$ и $Cd^{2+}$ вызывают начальную стимуляцию (повышение на 5–10% через 1 ч), что может быть связано с их ролью как эссенциальных микроэлементов, активирующих метаболизм [Соседова *и др.*, 2021]. Однако через 24 ч наблюдается угнетение ($p < 0.05$), предшествующее иммобилизации, что указывает на переход к токсическому эффекту. Летальные дозы вызывают быстрое угнетение уже через 1 ч, опережая гибель, что подтверждает ценность этого параметра для ранней диагностики [Khattab *et al*., 2022]. Для катионов $Zn^{2+}$, $Pb^{2+}$ и $Ni^{2+}$ тенденции аналогичны, но с более постепенным угнетением (снижение на 10-20% за 24 ч), в то время как для катионов $Fe^{2+}$ характерна наименьшая токсичность, с минимальными изменениями даже при 1000 ПДК. Это может объясняться более низкой биодоступностью железа и его ролью в ферментативных процессах [Кузьмина, 2019].

В целом, полученные данные подчеркивают важность учета смесевых эффектов в биотестировании, поскольку реальные загрязнения редко бывают монокомпонентными [Notova *et al*., 2022].

## ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь в рамках проекта 10.3.05.09 ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда», подпрограмма 3 «Радиация и биологические системы» на 2021–2025 годы (№ ГР 20211863).

*Конфликт интересов (Conflicts of Interest)*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гривенникова В.Г., Виноградов А.Д. (**2013**) Генерация активных форм кислорода митохондриями. *Успехи биологической химии*. **53**: 245-296.

ГОСТ 32426-2013 (**2013**) Методы испытаний химической продукции, представляющей опасность для окружающей среды. Испытание ряски на угнетение роста. Стандартинформ. Москва.

Живицкая Е.П., Сыса А.Г., Галах А.К., Яковлева А.П., Бученков И.Э., Лемешевский В.О. (**2024**) Характеристика токсикологических эффектов тяжелых металлов на физиологические показатели большой дафнии (*Daphnia magna*). *Вестник Полесского государственного университета. Серия природоведческих наук*. **2**: 21-29.

Жмур Н.С. (**2018**) Экотоксикологический контроль. Приемы исследования и лабораторная практика. АКВАРОС. Москва: 471.

Кузьмина В.В. (**2019**) Влияние металлов на активность и характеристики пищеварительных гидролаз у рыб (обзор). *Проблемы биологии продуктивных животных*. **1**: 5-24. https://doi.org/10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2019.1.5-24

Лошадкин Н.А., Гладких В.Д., Голденков В.А., Синицын А.Н., Дарьина Л.В., Буланова Л.П. (**2002**) Пробит-метод в оценке эффектов физиологически активных веществ при низких уровнях воздействия. *Российский химический журнал*. **46**(6): 63-67.

Олькова А.С., Санникова Е.А., Будина Д.В., Кутявина Т.И., Зимонина Н.М. (**2017**) Оценка токсичности природных и техногенных сред по двигательной активности *Daphnia magna*. *Современные проблемы науки и образования*. Электронный ресурс. (дата обращения 24.06.2025). https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=26428.

Скугорева С.Г., Ашихмина Т.Я., Фокина А.И., Лялина Е.И. **(2016)** Химические основы токсического действия тяжёлых металлов (обзор). *Теоретическая и прикладная экология*. **1**: 4-13.

Соседова Л.М., Титов Е.А., Новиков М.А., Шурыгина И.А., Шурыгин М.Г. (**2021**) Воздействие наночастиц металлов на водный биоценоз (обзор литературы). *Гигиена и санитария*. **100**(1): 30-35. https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-1-30-35.

Шилова Н.А., Рогачева С.М., Губина Т.И. (**2010**) Влияние биогенных металлов на жизнедеятельность *Daphnia magna*. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. **12**(1-8): 1951-1953.

ЭкоНиП 17.06.01-006-2023 (**2023**) Охрана окружающей среды и природопользование. Гидросфера. Нормативы качества воды поверхностных водных объектов.

Chou T.C. (**2010**) Drug combination studies and their synergy quantification using the Chou-Talalay method. *Cancer Research*. **70**(2): 440–446. https://doi.org/10.1158/0008-5472.CAN-09-1947.

Duruibe J.O., Ogwuegbu M.O., Egwurugwu J.N. (**2007**) Heavy metal pollution and human biotoxic effects. *International Journal of Physical Sciences*. **2**(5): 112-118. https://academicjournals.org/journal/IJPS/article-full-text-pdf/59CA35213127

Hagopian-Schlekat T., Chandler G.T., Shaw J.R., Ferguson P.L., Sabo-Attwood T.L., Buchwalter D.B. (**2001**) Metal bioaccumulation and toxicity in aquatic invertebrates: a review. *Environmental Toxicology and Chemistry*. **20**(2): 369-375.

Khattab A.M., Abo-Taleb H.A., Abdelaziz A.M., El-Tabakh M.A.M., El-Feky M.M.M., Abu-Elghait M. (**2022**) *Daphnia magna* and *Gammarus pulex*, novel promising agents for biomedical and agricultural applications. *Scientific Reports*. **12**(1): 13690. https://doi.org/10.1038/s41598-022-17790-z

Kou Y., Zhang W., Zhang Y., Ge X., Wu Y. (**2024**) Toxic effects of trace metal (loid) mixtures on aquatic organisms. *Science of The Total Environment*. 174677. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174677

Lampert W. (**2011**) Daphnia: Development of a Model Organism in Ecology and Evolution. *Excellence in Ecology*. **21**: 1-275.

Liebers M., Hommel E., Grübler B., Danehl J., Offermann S., Pfannschmidt T. (**2023**) Photosynthesis in the Biomass Model Species *Lemna minor* Displays Plant-Conserved and Species-Specific Features. *Plants*. **12**: 2442. https://doi.org/10.3390/plants12132442

Luhana K. (**2022**) Duckweeds: The Tiny Creatures for Resolving the Major Environmental Issues. In: Arora S., Kumar A., Ogita S., Yau Y.Y. (eds) Innovations in Environmental Biotechnology. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4445-0_38

Neidoni D.G., Nicorescu V., Andres L., Ihos M., Lehr C.B. (**2018**) The Capacity of *Lemna minor L.* to accumulate heavy metals (zinc, copper, nickel). *Revista De Chimie*. **69**: 4153-4156. https://doi.org/10.37358/RC.18.11.6724

Notova S.V., Marshinskaya O.V., Kazakova T.V., Miftakhova A.M. (**2022**) Study of the influence of heavy metals and their mixtures on the body (review). *Animal Husbandry and Fodder Production*. **105**(3): 19-33. https://doi.org/10.33284/2658-3135-105-3-19

Pei Z., Shan X., Wen B., Zhang Sh., Yan L., Khan Sh. (**2006**) Effect of copper on the adsorption of p-nitrophenol onto soils. *Environmental Pollution*. **139**(3): 541-549. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.05.025

Sasmaz M., Arslan Topal E.I., Obek E., Sasmaz A. (**2015**) The potential of Lemna gibba L. and Lemna minor L. to remove Cu, Pb, Zn, and As in gallery water in a mining area in Keban, Turkey. *Journal of Environmental Management*. **163**: 246-253. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.08.029

Vámos S., Li C., Moradi A., van Moorsel S.J. (**2024**) High tolerance to zinc but no evidence for local adaptation in the aquatic plant *Lemna minor*. *Nordic Journal of Botany*. (7): e04078. https://doi.org/10.1111/njb.04078

Verstijnen Y.J.M., Lucassen E.C.H.E.T., Wagenvoort A.J., Ketelaars H.A.M., van der Velde G., Smolders A.J.P. (**2024**) Trophic Transfer of Cd, Cu, Pb, Zn, P and Se in Dutch Storage Water Reservoirs. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. **86**(3): 217-233. https://doi.org/10.1007/s00244-023-01041-x

Vijver M.G., Elliott E.G., Peijnenburg W.J., de Snoo G.R. (**2011**) Response predictions for organisms water-exposed to metal mixtures: a meta-analysis. *Environmental Toxicology and Chemistry*. **30**(6): 1482-1487. https://doi.org/10.1002/etc.499

## REFERENCES

Grivennikova V.G., Vinogradov A.D. (**2013**) Generation of reactive oxygen species by mitochondria. *Successes of biol. chemistry*. **53**: 245-296. (In Rus.)

GOST 32426-2013 (**2013**) Test methods for chemical products that pose a danger to the environment. Duckweed testing for growth inhibition. (In Rus.)

Zhivitskaya E.P., Sysa A.G., Galakh A.K., Yakovleva A.P., Buchenkov I.E., Lemeshevsky V.O. (**2024**) Characterization of the toxicological effects of heavy metals on the physiological parameters of *Daphnia magna*. *Bulletin of Polessky State University. A series of natural sciences*. **2**: 21-29. (In Rus.)

Zhmur N.S. (**2018**) Ecotoxicological control. Research techniques and laboratory practice. Moscow: AKVAROS Publishing House: 472. (In Rus.)

Kuzmina V.V. (**2019**) The effect of metals on the activity and characteristics of digestive hydrolases in fish (review). *Problems of biology of productive animals*. **1**: 5-24. (In Rus.)

Loshadkin N.A., Gladkikh V.D., Goldenkov V.A., Sinitsyn A.N., Darina L.V., Bulanova L.P. (**2002**) Probit is a method for evaluating the effects of physiologically active substances at low levels of exposure. *Russian Chemical Journal*. **46**(6):63-67. (In Rus.)

Olkova A.S., Sannikova E.A., Budina D.V., Kutyavina T.I., Zimonina N.M. (**2017**) Assessment of the toxicity of natural and man-made environments by *Daphnia magna* motor activity. *Modern problems of science and education*. Electronic resource. (accessed 06/24/2025). https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=26428. (In Rus.)

Skugoreva S.G., Ashikhmina T.Ya., Fokina A.I., Lyalina E.I. (2016) Chemical bases of toxic effect of heavy metals (review). Theoretical and applied ecology. **1**: 4-13. (In Rus.)

Sosedova L.M., Titov E.A., Novikov M.A., Shurygina I.A., Shurygin M.G. (**2021**) The effect of metal nanoparticles on the aquatic biocenosis (literature review). *Hygiene and sanitation*. **100**(1): 30-35. https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-1-30-35 (In Rus.)

Shilova N.A., Rogacheva S.M., Gubina T.I. (**2010**) The effect of biogenic metals on the vital activity of *Daphnia magna*. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. **12**(1-8): 1951-1953. (In Rus.)

EcoNiP 17.06.01-006-2023 (**2023**) Environmental protection and environmental management. The hydrosphere. Standards of water quality of surface water bodies. (In Rus.)

Chou T.C. (**2010**) Drug combination studies and their synergy quantification using the Chou-Talalay method. *Cancer Research*. **70**(2): 440–446. https://doi.org/10.1158/0008-5472.CAN-09-1947.

Duruibe J.O., Ogwuegbu M.O., Egwurugwu J.N. (**2007**) Heavy metal pollution and human biotoxic effects. *International Journal of Physical Sciences*. **2**(5): 112-118. https://academicjournals.org/journal/IJPS/article-full-text-pdf/59CA35213127

Hagopian-Schlekat T., Chandler G.T., Shaw J.R., Ferguson P.L., Sabo-Attwood T.L., Buchwalter D.B. (**2001**) Metal bioaccumulation and toxicity in aquatic invertebrates: a review. *Environmental Toxicology and Chemistry*. **20**(2): 369-375.

Khattab A.M., Abo-Taleb H.A., Abdelaziz A.M., El-Tabakh M.A.M., El-Feky M.M.M., Abu-Elghait M. (**2022**) *Daphnia magna* and *Gammarus pulex*, novel promising agents for biomedical and agricultural applications. *Scientific Reports*. **12**(1): 13690. https://doi.org/10.1038/s41598-022-17790-z

Kou Y., Zhang W., Zhang Y., Ge X., Wu Y. (**2024**) Toxic effects of trace metal (loid) mixtures on aquatic organisms. *Science of The Total Environment*. 174677. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174677

Lampert W. (**2011**) Daphnia: Development of a Model Organism in Ecology and Evolution. *Excellence in Ecology*. **21**: 1-275.

Liebers M., Hommel E., Grübler B., Danehl J., Offermann S., Pfannschmidt T. (**2023**) Photosynthesis in the Biomass Model Species *Lemna minor* Displays Plant-Conserved and Species-Specific Features. *Plants*. **12**: 2442. https://doi.org/10.3390/plants12132442

Luhana K. (**2022**) Duckweeds: The Tiny Creatures for Resolving the Major Environmental Issues. In: Arora S., Kumar A., Ogita S., Yau Y.Y. (eds) Innovations in Environmental Biotechnology. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4445-0_38

Neidoni D.G., Nicorescu V., Andres L., Ihos M., Lehr C.B. (**2018**) The Capacity of *Lemna minor L.* to accumulate heavy metals (zinc, copper, nickel). *Revista De Chimie*. **69**: 4153-4156. https://doi.org/10.37358/RC.18.11.6724

Notova S.V., Marshinskaya O.V., Kazakova T.V., Miftakhova A.M. (**2022**) Study of the influence of heavy metals and their mixtures on the body (review). *Animal Husbandry and Fodder Production*. **105**(3): 19-33. https://doi.org/10.33284/2658-3135-105-3-19

Pei Z., Shan X., Wen B., Zhang Sh., Yan L., Khan Sh. (**2006**) Effect of copper on the adsorption of p-nitrophenol onto soils. *Environmental Pollution*. **139**(3): 541-549. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.05.025

Sasmaz M., Arslan Topal E.I., Obek E., Sasmaz A. (**2015**) The potential of Lemna gibba L. and Lemna minor L. to remove Cu, Pb, Zn, and As in gallery water in a mining area in Keban,

Turkey. *Journal of Environmental Management*. **163**: 246-253. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.08.029

Vámos S., Li C., Moradi A., van Moorsel S.J. (**2024**) High tolerance to zinc but no evidence for local adaptation in the aquatic plant *Lemna minor*. *Nordic Journal of Botany*. (7): e04078. https://doi.org/10.1111/njb.04078

Verstijnen Y.J.M., Lucassen E.C.H.E.T., Wagenvoort A.J., Ketelaars H.A.M., van der Velde G., Smolders A.J.P. (**2024**) Trophic Transfer of Cd, Cu, Pb, Zn, P and Se in Dutch Storage Water Reservoirs. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. **86**(3): 217-233. https://doi.org/10.1007/s00244-023-01041-x

Vijver M.G., Elliott E.G., Peijnenburg W.J., de Snoo G.R. (**2011**) Response predictions for organisms water-exposed to metal mixtures: a meta-analysis. *Environmental Toxicology and Chemistry*. **30**(6): 1482-1487. https://doi.org/10.1002/etc.499

Цитировать как

Сыса А.Г., Живицкая Е.П., Кравченя Н.И. (**2025**). Токсичность катионов тяжелых металлов и их смесей для *Lemna minor* и *Daphnia magna* в контексте оценки экологических рисков. *Экобиотех*. **8** (3): 477-490. DOI: 10.31163/2618-964X/2025-34 EDN: XCMGUR

Сведения об авторе

**Алексей Григорьевич Сыса**, к.х.н., доцент, Белорусский государственный университет, МГЭИ им. А.Д. Сахарова БГУ, Минск, Республика Беларусь. E-mail: aliaksei.sysa@iseu.by, SPIN-код: 8718-5495, ORCID: 0000-0001-8881-5973, Scopus Author ID: 56086737800, WoS Research ID: Q-6020-2018

**Елена Петровна Живицкая**, старший преподаватель, Белорусский государственный университет, МГЭИ им. А.Д. Сахарова БГУ, Минск, Республика Беларусь. E-mail: lenokk@tut.by, SPIN-код: 5107-4671, ORCID: 0000-0003-4743-671X

**Наталья Ивановна Кравченя**, аспирант, Белорусский государственный университет, МГЭИ им. А.Д. Сахарова БГУ, Минск, Республика Беларусь. E-mail: ankona@list.ru

Cited as

Sysa A.G., Zhyvitskaya E.P., Krauchenia N.I. (**2025**). Toxicity of heavy metal cations and their mixtures to *Lemna minor* and *Daphnia magna* in the context of ecological risk assessment. *Ecobiotech*. **8** (3): 477-490. DOI: 10.31163/2618-964X/2025-34 EDN: XCMGUR (In Rus.)

Information About the Author

**Aliaksei G. Sysa**, PhD in Chemical Sciences, associate professor, Belarusian State University, ISEI BSU, Minsk, Republic of Belarus. E-mail: aliaksei.sysa@iseu.by, SPIN-код: 8718-5495, ORCID: 0000-0001-8881-5973, Scopus Author ID: 56086737800, WoS Research ID: Q-6020-2018

**Elena P. Zhyvitskaya**, senior lecturer, Belarusian State University, ISEI BSU, Minsk, Republic of Belarus. E-mail: lenokk@tut.by, SPIN-код: 5107-4671, ORCID: 0000-0003-4743-671X

**Natalia I. Krauchenia**, PhD student, Belarusian State University, ISEI BSU, Minsk, Republic of Belarus. E-mail: ankona@list.ru