

ЭКОТОКСИКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ БИНАРНЫХ СМЕСЕЙ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ НА ПОДВИЖНОСТЬ БОЛЬШОЙ ДАФНИИ (*DAPHNIA MAGNA*)

ECOTOXICOLOGICAL ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF BINARY MIXTURES OF HEAVY METALS ON THE MOBILITY 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
galax_n@mail.ru

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

В настоящей работе исследовано влияние на подвижность *Daphnia magna* бинарных смесей катионов. Показано для ионов Pb^{2+} и Cd^{2+} в области низких концентраций (0,05-0,7 мг/л и 0,05-0,1 мг/л, соответственно), что добавление Cu^{2+} наблюдался синергетический эффект, а в области высоких концентраций совместный эффект менялся на антагонистический. Что касается ионов Ni^{2+} , то во всем диапазоне концентраций наблюдался антагонистический эффект при добавлении Cu^{2+} . При исследовании эффектов смеси катионов Ni^{2+} с ионами Cu^{2+} , Cd^{2+} и Pb^{2+} все изученные смеси ионов металлов приводили к усилению угнетения подвижности рачков дафнии, т.е. наблюдается синергетический эффект. Порядок токсичности смесей для *Daphnia magna* уменьшался в ряду $Cd+Ni > Cu+Ni > Pb+Ni$.

The effect of binary mixtures of cations on the mobility of *Daphnia magna* has been studied. It was shown for Pb^{2+} and Cd^{2+} ions at low concentrations (0.05-0.7 mg/l and 0.05-0.1 mg/l, respectively) that the addition of Cu^{2+} had a synergistic effect, and at high concentrations the combined effect changed to antagonistic. As for Ni^{2+} ions, an antagonistic effect was observed in the entire concentration range when Cu^{2+} was added. When studying the effects of a mixture of Ni^{2+} cations with Cu^{2+} , Cd^{2+} and Pb^{2+} ions, all the studied mixtures of metal ions resulted in increased inhibition of the mobility of daphnia crustaceans, i.e. a synergistic effect is observed. The order of toxicity of mixtures for *Daphnia magna* decreased in the series $Cd+Ni > Cu+Ni > Pb+Ni$.

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

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

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2024-2-27-30>

Daphnia magna – широко используемый организм в экотоксикологии из-за своей чувствительности к различным металлам, что делает ее полезным индикатором загрязнения окружающей среды. Так, в ходе исследования (Biesinger, 1972) оценивалась токсичность различных металлов для *Daphnia magna* на основе значений LC_{50} в 48-часовом и 3-недельном эксперименте, а также влияние на репродуктивную функцию. Значения LC_{50} по истечении 48 часов для протестированных металлов варьировались от 0,01 мг/л для Hg до 1,0 мг/л для Cu, тогда как значения LC_{50} в 3-недельном эксперименте варьировались от 0,002 мг/л для Hg до 0,5 мг/л для Cu. Что касается репродуктивных эффектов металлов, то они обычно наблюдались при концентрациях ниже, чем те, которые вызывают острую токсичность.

В работе (Poynnton, 2007) показан потенциал *Daphnia magna* в качестве модели для токсикологической геномики: профилирование экспрессии генов позволяет выявить биомаркеры и способы действия в ответ на воздействие металлов. В работе (Bownik, 2017) в качестве чувствительного биомаркера для оценки токсичности предложена такая универсальная биологическая характеристика *Daphnia magna* как подвижность. Автор обосновывает потенциальную возможность контроля подвижности как новый методологический подход к оценке токсичности и мониторингу качества воды, современное состояние знаний о влиянии различных химических соединений на параметры подвижности дафний, а также обсуждает преимущества и ограничений плавательного поведения как инструмента токсикологии. Подвижность может изменяться под воздействием пестицидов, наночастиц, бактериальных продуктов или других химических вещества. Кроме того, создан Консорциум по геномике дафний для продвижения использования дафний в токсикологической геномике, используя ее уникальные биологические свойства (Shaw, 2008).

Что касается оценки влияния тяжелых металлов на дафний, установлено, что тяжелые металлы, такие как Hg, Cd, Cu, Pb и Cr, оказывают токсическое воздействие на *Daphnia magna*, причем наиболее токсичной является

ругуть (Meng, 2008). Токсичность этих металлов еще больше усиливается, когда они присутствуют в смеси, при этом присутствие ионов меди снижает общую токсичность некоторых смесей (Meng, 2008). На интегральную токсичность тяжелых металлов также могут также влиять химически нейтральные компоненты водной среды. Так, адсорбционная способность микропластика к тяжелым металлам влияет на их экотоксичность: более мелкие микропластики обладают более высокой адсорбционной способностью и более высоким токсикологическим риском (Юань, 2020). Установлено, что *D. magna* более чувствительна к металлам, чем другие организмы, например, такие как *Tubifex Tubifex* (Fargašová, 1994).

В целом, к настоящему времени накоплено большое количество данных по экотоксичности, особенно для отдельных соединений (отдельных ионов металлов), однако исследований, проведенных с использованием смесей различных ионов металлов меньше, хотя подобные исследования чрезвычайно важны с практической точки зрения с учетом возможных взаимодействий 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. Интерактивное воздействие бинарных смесей металлов на *D. magna* изучалось несколькими исследователями. В работе (Kungolos, 2004) показано, что интерактивное воздействие бинарных смесей металлов на *D. magna* может являться синергическим, аддитивным или антагонистическим. Парк (2019) обнаружил, что токсические эффекты $ZnSO_4$ более значительны, чем эффекты наночастиц $PVP-Fe_3O_4$, при этом взаимодействие между двумя компонентами в бинарных смесях зависит от их концентраций. Лари (2017) заметил, что смеси Zn-Cu и Cu-Cd обладали более чем аддитивными (потенцирование, синергизм) эффектами на смертность дафний, тогда как смеси Ni-Cd приводили к менее чем аддитивной смертности (антагонизм). С точки зрения поведенческих реакций, смеси Zn-Cu и Zn-Cd вызывали более чем аддитивное снижение уровня потребления пищи. Перес (2017) продемонстрировал, что сублетальные концентрации Zn недостаточны для защиты *D. magna* от хронической токсичности Cd, в то время как более высокие концентрации Zn способствуют токсичности. Бизингер (1986) обнаружил, что бинарные смеси Cd-Hg, Cd-Zn и Zn-Hg приводят к значительному снижению воспроизводства *D. magna*. Эти исследования в совокупности подчеркивают сложные и разнообразные интерактивные эффекты бинарных смесей металлов на *D. magna*. В любом случае эффекты сложны и разнообразны, что подчеркивает необходимость дальнейших исследований в этой области.

Целью настоящего исследования является оценка экотоксических эффектов бинарных смесей тяжелых металлов меди (II), железа (II), свинца и никеля. Ранее нами было показано, что эффективность угнетения двигательной активности особей большой дафнии снижается в ряду $Cu^{2+} > Cd^{2+} > Pb^{2+} > Ni^{2+}$, что подтверждается рассчитанными значениями EC_{50} : $EC_{50} Cu^{2+}$ (0,11 мг/л) $\approx EC_{50} Cd^{2+}$ (0,14 мг/л) $< EC_{50} Pb^{2+}$ (1,41 мг/л) $< EC_{50} Ni^{2+}$ (2,84 мг/л). В настоящей работе проведено исследование влияния на подвижность *Daphnia magna* смеси катиона, показавшего максимальную эффективность: Cu^{2+} в концентрации равной EC_{50} (0,11 мг/л) – и ионов кадмия, свинца и никеля в концентрациях 10^{-3} - 10^1 мг/мл. (рисунок 1). Аналогичным способом исследованы эффекты смеси катионов никеля (самый неэффективный с точки зрения угнетения подвижности) в концентрации равной EC_{50} (2,84 мг/л) с ионами меди, кадмия и свинца (рисунок 2).

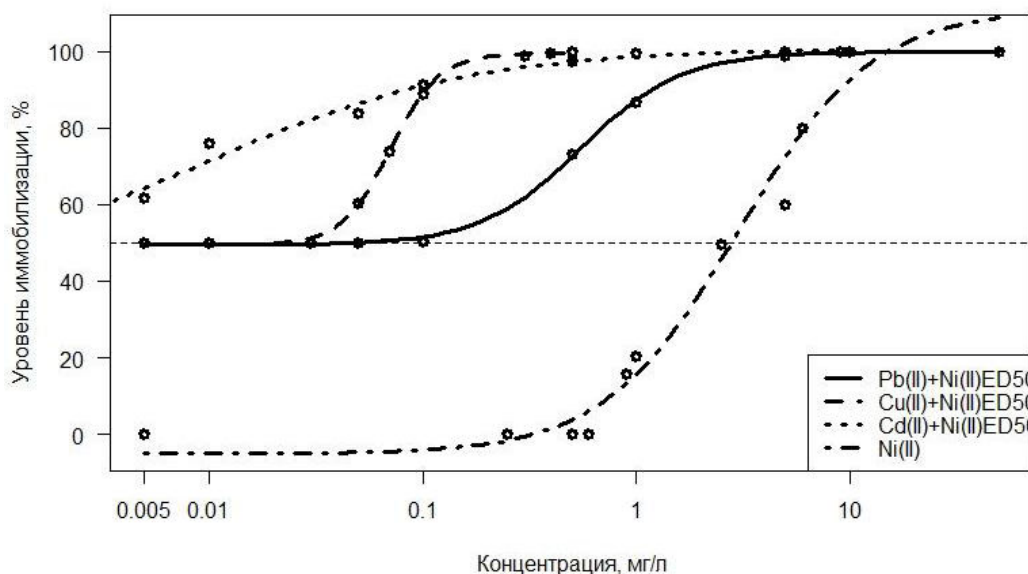


Рисунок 1 – Логарифмические кривые зависимости доза-эффект влияния на подвижность *Daphnia magna* металлов Pb, Ni и Cd как функция от концентрации Cu

Как следует из данных, представленных на рисунке 1, для ионов свинца и кадмия в области низких концентраций (0,05-0,7 мг/л и 0,05-0,1 мг/л, соответственно) с добавлением меди наблюдался синергетический эффект (совместный эффект больше суммы эффектов при их независимом действии), т. е. низкие концентрации Pb и Cd

потенцировали угнетение подвижности рачков ионами меди. В тоже время в области высоких концентраций совместный эффект менялся на антагонистический (общий эффект меньше суммы эффектов каждого фактора). Что касается ионов никеля, то во всем диапазоне концентраций наблюдался антагонистический эффект.

Следует отметить, что влияние бинарной смеси свинца и меди на *Daphnia magna* изучалось в контексте мультиметаллических взаимодействий (Комьярова, 2008). В ряде исследований изучалось влияние меди и никеля на *Daphnia magna*. Бизингер (1972) обнаружил, что эти металлы могут быть токсичными для вида, причем более высокие концентрации приводят к снижению выживаемости, роста и размножения. Шамфелер (2002) дополнительно исследовал влияние меди и обнаружил, что ее токсичность можно снизить с помощью определенных ионов и уровней pH. Крамер (2004) и Эндрю (1977) исследовали роль растворенных органических веществ и неорганических комплексообразователей в снижении биодоступности и токсичности меди соответственно. Перес (2017) обнаружил, что сублетальные концентрации цинка в сочетании с кадмием могут оказывать защитное действие на *D. magna*, тогда как более высокие концентрации цинка могут способствовать токсичности. Это говорит о том, что присутствие цинка может модулировать токсичность кадмия. Аналогичным образом, Ким (2010) заметил, что добавление одностенных углеродных нанотрубок с модифицированной поверхностью может повысить поглощение и токсичность меди *D. magna*. Ряд исследований посвящен оценке токсичности смеси меди и одностенных углеродных нанотрубок (Ким, 2010), воздействию водного стабильного нанокристалла фуллерена (nC60) на медь (Тао, 2013) и совместному действию циперметрина и меди (Westergaard, 2012). В совокупности эти исследования показывают, что присутствие меди может влиять на биодоступность и токсичность других металлов, включая свинец, в *Daphnia magna*.

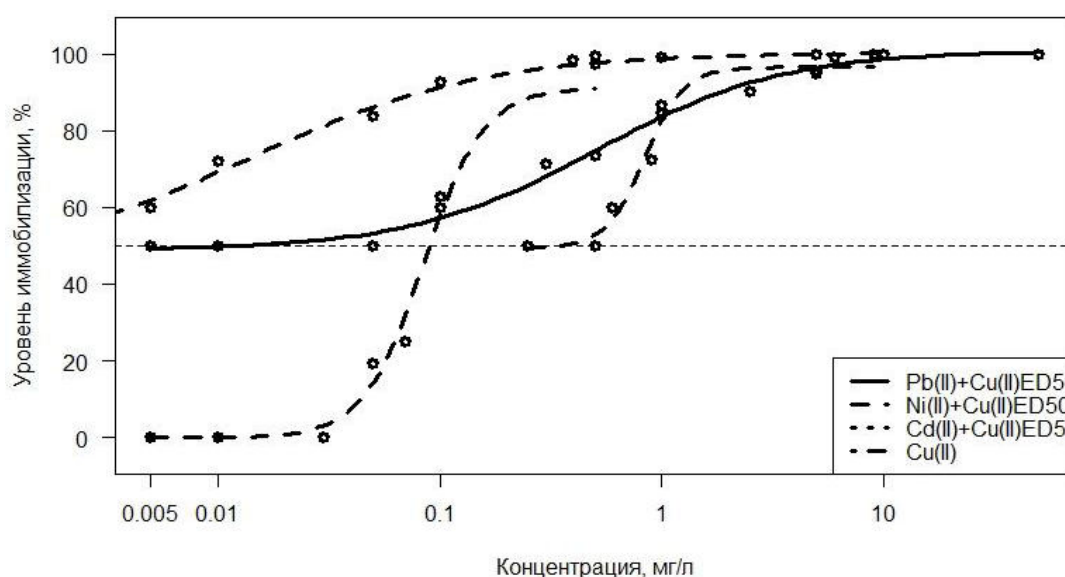


Рисунок 2 – Логарифмические кривые зависимости доза-эффект влияния на подвижность *Daphnia magna* металлов Pb, Cu и Cd как функция от концентрации Ni

Совершенно иные результаты получены при исследовании эффектов смеси катионов никеля (самый неэффективный с точки зрения угнетения подвижности) в концентрации равной EC_{50} с ионами меди, кадмия и свинца. Как следует из данных, представленных на рисунке 2, все изученные смеси ионов металлов приводят к усилению угнетения подвижности рачков дафнии, т. е. наблюдается синергетический эффект. Порядок токсичности смесей для *Daphnia magna* уменьшался в ряду $Cd+Ni > Cu+Ni > Pb+Ni$.

В ряде исследований показано, что воздействие бинарной смеси свинца и никеля на *Daphnia magna* сложное и может варьироваться в зависимости от конкретных свойств загрязняющих веществ и условий воздействия. Ванденбрук (2009) обнаружил, что молекулярные реакции на смесь не были просто аддитивными, что указывает на интерактивные эффекты. Павлаки (2011) наблюдал синергический характер сублетальных доз смеси имидаклоприда и никеля, однако статистически значимых различий между моделями независимого и совместного влияния на плодовитость не установлено. Перес (2018) сообщил, что более низкие концентрации никеля в смеси кадмия и никеля защищают *D. magna* от токсичности кадмия, но более высокие концентрации никеля способствуют токсичности. Ким (2017) обнаружил, что токсичность никеля в сочетании с микропластиком отличается от токсичности одного никеля, причем иммобилизация выше в присутствии определенных функциональных групп микропластика.

Что касается экотоксических эффектов кадмия и никеля, то указанные тяжелые металлы оказывают токсическое воздействие на *Daphnia magna*. Исследования показали, что кадмий может накапливаться в организме *D. magna*, что приводит к повышению чувствительности и потенциальному вреду (Heugens, 2003). Точно так же было обнаружено, что никель более токсичен, чем другие металлы, что приводит к уменьшению численности потомства *D. magna* (Biesinger, 1972). Когда эти два металла сочетаются, их воздействие может быть еще более

токсичным. Например, исследование Павлаки (2011) показало, что бинарная смесь имидаклоприда и хлорида никеля оказывает синергетический эффект на численность потомства *D. magna*.

Таким образом, наши данные в совокупности с данными, полученными другими исследователями, подчеркивают необходимость дальнейших исследований для понимания сложного взаимодействия и влияния бинарных смесей тяжелых металлов на *Daphnia magna*.

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ЧИСЛЕННОСТИ ПОПУЛЯЦИЙ СИЗОГО ГОЛУБЯ (COLUMBA LIVIA, GM., 1789) В БОБРУЙСКЕ И СЕЛЬСКОМ НАСЕЛЕННОМ ПУНКТЕ

SEASONAL DYNAMICS OF THE ROCK PIGEON POPULATIONS (COLUMBA LIVIA, GM., 1789) IN BOBRUISK AND RURAL SETTLEMENTS

А. Н. Голуб, И. М. Хандогий, А. В. Хандогий
A. N. Golub, I. M. Khandogiy, A. V. Khandogiy

Учреждение образования «Международный государственный экологический институт
имени А. Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ
г. Минск, Республика Беларусь
aleksgolub18@gmail.com

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

В работе представлены данные об сезонной динамике плотности популяции сизого голубя (*Columba livia*, Gm., 1789) и распространенности различных окрасочных морф в г. Бобруйске и д. Стасевка Бобруйского района. Выявлено повышение численности популяции сизых голубей в конце лета – начале осени. Определено преобладание черно-чеканной морфы в городской среде на протяжении всего года.

The paper presents data on the seasonal dynamics of the population density of the rock dove (*Columba livia*, Gm., 1789) and the prevalence of various color morphs in Bobruisk and v.Stasevka, Bobruisk district. An increase in the population of rock dove was revealed in late summer and early autumn. The predominance of the black-stamped morph in the urban environment throughout the year has been determined.

Ключевые слова: сизый голубь, популяция, полиморфизм, морфы, численность, сезонная динамика.

Keywords: rock dove, population, polymorphism, morphs, abundance, seasonal dynamics.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2024-2-30-33>

Введение. Количество популяций синантропных видов животных и птиц с каждым годом возрастает, что связано с благоприятными условиями существования рядом с человеком. Главными условиями обитания птиц в городских условиях является возможность адаптироваться и удовлетворить жизненно важные потребности. Изменяющиеся условия среды и длительность существования популяции в этих условиях определяют приспособительный характер, что проявляется в изменениях полиморфизма особей [1,5]. По характеру полиморфизма исследователи оценивают состояние популяций и условий среды обитания, определяют степень соответствия экологическим требованиям. Так, городские птицы являются наиболее удачными объектами биоиндикации, поскольку накапливают загрязняющие вещества и тяжелые металлы; имеют быстрый обмен веществ, способствующий быстрому проявлению воздействия негативных факторов среды обитания; разные органы и ткани обладают разной способностью накапливать поллютанты [2].

Доминирующим представителем урбанизированных экосистем является сизый голубь (*Columba livia*, Gm., 1789). Данный вид широко используется в биоиндикационных целях в силу высокой численности и плотности популяций, привязанности к постоянным местам гнездования, простоты и доступности наблюдений. Выявление взаимосвязи окрасочного полиморфизма с уровнем загрязнения окружающей среды тяжёлыми металлами представляет не только теоретический, но и практический интерес [1].

Сезонные явления являются одним из ключевых факторов, влияющих на жизнь птиц. В зимний период обедняется кормовая база, изменяются погодные условия (укорочение светового дня, снижение температуры), что влияет на численность популяции, количество миграций и даже на окрасочный полиморфизм [4].

Российские и белорусские орнитологи подразделяют синантропных голубей по окрасочному полиморфизму на три группы: сизые, чёрно-чеканные и «аберранты» [1–3, 5]. В стаях синантропных голубей чаще встречаются особи с разной степенью выраженности альбинизма, меланизма (от частично окрашенных черных перьев до окраски всей птицы), хромизма (рыжий, бурый). Особей дикой окраски обнаруживают в сельской местности и на окраинах города, как менее подверженных влиянию антропогенной нагрузки. Исходная морфа (дикий тип)