

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО НОРМИРОВАНИЯ: ОТ ТОЧЕЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ К ДИФFUЗНОМУ ЗАГРЯЗНЕНИЮ

Н.И. Кравченя, аспирант

Научный руководитель – Е.П. Живицкая, старший преподаватель

Белорусский государственный университет, МГЭИ им. А.Д.Сахарова БГУ

Введение. Современные экологические вызовы, связанные с антропогенным воздействием на водные экосистемы, требуют пересмотра традиционных подходов к нормированию. Если регулирование точечных источников (промышленные стоки, очистные сооружения) в целом регламентировано, то диффузное загрязнение, формируемое сельскохозяйственными стоками, атмосферными выбросами и поверхностным смывом, остается слабо контролируемым. Актуальность интеграции диффузных источников в систему нормирования подтверждается данными биотестирования на *Daphnia magna*, демонстрирующими нелинейные эффекты комбинированного воздействия тяжелых металлов.

Материалы и методы. Основой исследования послужили результаты 48-часовых тестов на иммобилизацию *Daphnia magna* при воздействии растворов $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ и $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$. Контрольные образцы содержали искусственную пресную воду (KCl , NaHCO_3 , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) с pH $7,0 \pm 0,1$.

Для анализа дозо-эффектных зависимостей использовалась лог-логистическая модель (LL.4, пакет *drtm* в R), позволяющая оценить параметры EC_{50} и характер кривых токсичности.

Результаты и обсуждение. Результаты показали выраженную градацию токсичности отдельных ионов: Cu^{2+} ($\text{EC}_{50} = 0,11$ мг/л) > Cd^{2+} (0,14) > Pb^{2+} (1,41) > Ni^{2+} (2,84). Однако ключевой вывод касается поведения бинарных смесей. Например, комбинация Cu^{2+} и Cd^{2+} в низких концентрациях (0,05–0,7 мг/л) демонстрировала синергетический эффект, увеличивая иммобилизацию на 25–30%

по сравнению с аддитивной моделью. В то же время при высоких концентрациях (свыше 1 мг/л) эффект становился антагонистическим, что связано, вероятно, с конкурентным связыванием ионов на биологических рецепторах. Особый интерес представляют смеси Ni^{2+} с другими металлами: во всех случаях наблюдался синергизм, снижающий пороговые значения EC_{50} на 35–40%.

Эти данные подчеркивают ограниченность традиционного подхода, ориентированного на моноэкспозицию. Например, в сельскохозяйственных регионах Беларуси концентрация NO_3^- в подземных водах достигает 65 мг/л при ПДК 45 мг/л, однако существующие нормативы не учитывают комбинированное воздействие с тяжелыми металлами. Накопление последних в почвах и их постепенный вынос в водоемы создает условия для долгосрочного токсического эффекта, что подтверждается снижением биоразнообразия в малых реках регионов Республики Беларусь.

Перспективным направлением совершенствования нормирования является внедрение моделей экологической емкости, учитывающих как химические параметры, так и данные биотестирования. Использование *Daphnia magna* в качестве биоиндикатора позволяет оценить не только прямую токсичность, но и синергетические эффекты, что особенно актуально для диффузного загрязнения. Например, выявленный антагонизм Cu^{2+} и Ni^{2+} в высоких концентрациях указывает на необходимость корректировки нормативов для промышленных зон, где эти металлы присутствуют совместно.

Важным шагом стала гармонизация предлагаемых подходов с международными стандартами, такими как Директива ЕС 2000/60/ЕС. Интеграция ГИС-технологий для прогнозирования диффузных потоков и создание базы данных по толерантности гидробионтов к смесям загрязнителей позволят перейти от реактивного к превентивному управлению качеством водных ресурсов.

Заключение. Таким образом, совершенствование системы экологического нормирования требует комплексного учета как точечных, так и диффузных источников. Результаты исследований на *Daphnia magna* подтверждают, что игнорирование комбинированных эффектов тяжелых металлов может привести к недооценке экологических рисков. Внедрение биоиндикационных методов и математических моделей, учитывающих нелинейность дозо-эффектных зависимостей, станет основой для разработки адаптивных нормативов, соответствующих современным вызовам.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда» (№ ГР 20211863).

Список использованных источников

1. Ali, H. Bioaccumulation of non-essential hazardous heavy metals and metalloids in freshwater fish. Risk to human health. H. Ali, E. Khan // Environ. Chem. Lett. - 2018. - Vol. 16. - P. 903-917.
2. Heavy Metal Toxicity and the Environment. P.B. Tchounwou [et al.] // Molecular, Clinical and Environmental Toxicology. - 2012. – Vol. 101. – P. 133-164.
3. Continuous impact of mining activities on soil heavy metals levels and human health. G. Tepanosyan [et al.] // Sci. Total Environ. - 2018. - Vol. 639. - P. 900-909.
4. Systematic evaluation of chronic metal-mixture toxicity to three species and implications for risk assessment. C. Nys [et al.] // Environ. Sci. Technol. – 2017. – Vol. 51. - P. 4615-4623.
5. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. M. Jaishankar [et al.] // Interdiscipl. Toxicol. - 2014. - Vol. 7. - P. 60-72.
6. Heavy metals and human health: mechanistic insight into toxicity and counter defense system of antioxidants. A.T. Jan [et al.] // Int. J. Mol. Sci. - 2015. - Vol. 16. - P. 29592-29630.