

ЗАПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ РАННЬОГО ПОПЕРЕДЖЕННЯ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО ВИЯВЛЕННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ

Крайнюков О.М., Щокіна М.М.

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
майдан Свободи, 4, 61022, м. Харків
alkraynukov@gmail.com

У даному дослідженні проведено аналіз міжнародного досвіду впровадження систем раннього попередження при проведенні безперервного моніторингу якості поверхневих вод. Протягом останніх 15-20 років зростаюча обізнаність про антропогенні зміни водного середовища призвела до пошуку чутливих та екологічно значущих індикаторів впливу та сигналів раннього попередження на різних рівнях біологічної інтеграції, від субклітинної біофізики та біохімії до функціонування екосистеми. Окрім своєї ролі в фундаментальній екології, інтегративна поведінкова реакція цілого організму вже давно використовується в токсикології та фармакології ссавців. Однак для її використання в оцінці впливу фізичних та хімічних змін навколишнього середовища на тваринах були потрібні ширші екологічно орієнтовані концепції та нові кількісні методи, які зараз розробляються. Нещодавні технічні та методологічні досягнення включають цифровізацію миттєвих реакцій та комп'ютеризований аналіз відеозображень, що надає можливість для сучасного поведінкового тестування та впровадження систем раннього попередження у водоохоронну практику в різних країнах світу. Поведінка тест-об'єктів є сполучною ланкою між організмами та їхнім середовищем мешкання і має вирішальне значення для біологічної адаптації. Незважаючи на численні дослідження, що демонструють чутливість та корисність поведінкових кінцевих точок у біологічних аналізах, що оцінюють потенційний вплив забруднювачів у водних екосистемах, тестування поведінкової токсичності за допомогою систем раннього попередження історично не включалося до оцінок водної токсичності та подальшого формування екологічної політики. Результати оцінок поведінкового ризику можуть дозволити продемонструвати, що хімічна речовина є не просто потенційно небезпечною, а й викликає функціональні зміни у тварини. У цьому відношенні фахівці мають підстави, рекомендують дії не на основі ізольованих, нефункціональних змін, таких як гостра або хронічна токсичність. Сублетальні ефекти забруднювачів повинні викликати великий інтерес та занепокоєння у фахівців, які розробляють екологічну політику та критерії якості води, оскільки набагато більше водних організмів стикаються з сублетальними, а не гостро або хронічно летальними концентраціями забруднювачів у природі. *Ключові слова:* забруднення вод, токсичні властивості води, тест-об'єкт, біологічний моніторинг, біотестування, системи раннього попередження.

Implementation of an early warning system for the rapid detection of pollution of water bodies. Krainiukov O., Shchokina M.

This study reviews international experience in implementing early warning systems for continuous monitoring of surface water quality. Over the past 15-20 years, increasing awareness of anthropogenic changes in the aquatic environment has led to the search for sensitive and ecologically relevant impact indicators and early warning signals at different levels of biological integration, from subcellular biophysics and biochemistry to ecosystem functioning. In addition to its role in fundamental ecology, integrative whole-organism behavioral response has long been used in mammalian toxicology and pharmacology. However, its use in assessing the impact of physical and chemical environmental changes on animals required broader ecologically oriented concepts and new quantitative methods, which are currently being developed. Recent technical and methodological advances include the digitization of instantaneous reactions and computerized analysis of video images, which provide an opportunity for modern behavioral testing and the implementation of early warning systems in water conservation practice in different countries of the world. Behavior of test subjects is the link between organisms and their environment and is crucial for biological adaptation. Despite numerous studies demonstrating the sensitivity and utility of behavioral endpoints in biological assays that assess the potential impact of pollutants in aquatic ecosystems, behavioral toxicity testing has historically not been included in aquatic toxicity assessments and subsequent environmental policy development. The results of behavioral risk assessments can demonstrate that a chemical is not only potentially hazardous but also causes functional changes in the animal. In this regard, experts are justified in recommending action not based on isolated, non-functional changes such as acute or chronic toxicity. Sublethal effects of pollutants should be of great interest and concern to specialists who develop environmental policies and water quality criteria, since many more aquatic organisms are exposed to sublethal rather than acutely or chronically lethal concentrations of pollutants in nature. *Key words:* water pollution, toxic properties of water, test object, biological monitoring, biotesting, early warning systems.

Постановка проблеми. У 2020 році лише в ЄС було зареєстровано для комерційного використання 29 000 унікальних хімічних речовин, а прогнозується, що світове виробництво хімічних речовин подвоїться між 2017 і 2030 роками [1, 2]. Дослідники стверджують, що таке масштабне виробництво хімічних речовин перевищує безпечний для планети робочий простір та перевищує можливості суспіль-

ства проводити відповідні оцінки безпеки [3]. Крім того, багато з цих хімічних речовин спеціально розроблені для впливу на біологічні системи, знаходячись застосування в біоцидах та фармацевтичних препаратах. Визначено, що 62% загального споживання хімічних речовин в ЄС еквівалентно 345 мільйонам тонн і було класифіковано як такі, що становлять небезпеку для здоров'я [2].

Виробництво, використання та утилізація хімічних речовин регулюються національними та міжнародними органами захисту довкілля та здоров'я людини. Стокгольмська конвенція про стійкі органічні забруднювачі, що діє в рамках Програми ООН з навколишнього середовища, набула чинності у 2004 році [4] та регулює хімічні речовини, які є стійкими, біоаккумулятивними, токсичними та підлягають особливого поводження. Однак, хоча обмеження щодо хімічних речовин є важливим інструментом управління ризиками, вони зазвичай часто мають не прогнозований характер. Хоча програма REACH [1] має на меті запобігти широкому використанню проблемних хімічних речовин, постійні приклади випадків забруднення та впливу свідчать про недоліки або неефективність, такі як глобальна проблема забруднення поверхневих вод важкими металами, що становить значний ризик для здоров'я людини, оскільки ці токсичні метали можуть накопичуватися в живих організмах з часом [5]. Важкі метали в поверхневих водах можуть потрапляти в організм людини різними шляхами, включаючи пиття, всмоктування через шкіру та проковтування забруднених ними продуктів [6].

Крім того, обмеження часто не враховують усі потенційні ризики, пов'язані з хімічними сумішами. Зрештою, обмеження хімічних речовин може супроводжуватися їх заміною потенційно невдалим альтернативами, які можуть створювати подібні небезпеки або погано вивчені ризики [7].

Отже, існує потреба у виявленні потенційних екологічних проблем, пов'язаних з виробництвом та використанням хімічних речовин і їх небезпечним впливом на водні екосистеми. Більшість дослідницьких ініціатив зосереджені на виявленні забруднюючих речовин, що викликають занепокоєння, використовуючи методи експериментального скринінгу [8, 9]. Нещодавні досягнення в аналітичній хімії дозволили проводити більш точні, вибіркові та чутливі кількісні визначення хімічного забруднення, проте інформація про токсичність хімічних сумішей та їх біодоступність часто відсутня під час хімічного скринінгу [10].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Авторський доробок поєднує фундаментальні наукові дослідження (екотоксикологія, поведінковий аналіз, інноваційні методики) з практичними викликами (моніторинг води, захист довкілля, охорона здоров'я людини).

Цей зв'язок особливо цінний, оскільки він: спрямований на створення більш оперативних і чутливих систем контролю; пропонує міждисциплінарний підхід (екологія + біологія + ІТ + інженерія); має значення для державної екологічної політики і сталого розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Загальна мета систем раннього попередження (СРП) полягає в ранньому виявленні потенційно проблемного забруднення хімічною речовиною чи сумішшю речовин,

що фіксує сигнал тривоги, після чого з мінімальною затримкою можна провести більш спеціалізовані дослідження та/або регуляторні заходи. Хоча СРП широко застосовуються для виявлення стихійних лих, їх застосування в оцінці хімічної небезпеки та ризику є менш поширеним. Метою СРП є запровадження можливостей для оперативного виявлення загроз забруднення води водних об'єктів, в ідеалі в будь-якому компоненті середовища без значних затримок.

З цієї метою СРП, ймовірно, охоплюватиме низку інструментів та методів оцінки, з використанням на першій стадії біологічних тест-організмів, впроваджених для оперативного виявлення токсикогенного забруднення води водних об'єктів різними джерелами забруднення. Головна задача цієї системи полягає у виявленні шкідливих хімічних речовин та ситуацій, які можуть спричинити негативний вплив на здоров'я людини або навколишнє середовище, на якомога ранній стадії. СРП повинна бути розроблена для передачі інформації відповідним органам, забезпечуючи якомога швидше вжиття відповідних заходів [11].

Системи СРП повинні мати можливість аналізувати та обробляти сигнали з місця подій як вхідні дані, потенційно в режимі реального часу. Враховуючи, що нові небезпеки можуть виникати в будь-який час або після тривалих періодів латентності, для виявлення сигналів знадобиться стратегія оперативного моніторингу в просторі та часі.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. У сучасній екотоксикології та практиці біомоніторингу залишається низка невирішених проблем та аспектів, які зумовлюють необхідність подальших експериментальних досліджень. Зокрема, недостатньо розроблені кількісні критерії оцінки поведінкових реакцій гідробіонтів як індикаторів токсичної дії, що обмежує можливості їх широкого застосування. Суттєвою проблемою біологічних систем раннього попередження є зниження надійності через хибні сигнали, пов'язані як із технічними факторами впливу, так і з природною варіабельністю живих організмів. Відсутність універсальних стандартів методичного забезпечення ускладнює порівнянність і відтворюваність результатів між різними лабораторіями. Крім того, наявні інструментальні методи хімічного аналізу не дозволяють у повній мірі враховувати комплексний вплив сумішей забруднюючих речовин. Недостатньо інтегрованими залишаються й сучасні цифрові технології, які здатні підвищити точність інтерпретації поведінкових даних. Усі ці прогалини окреслюють важливі напрями наукового пошуку, яким і присвячено дане дослідження.

Новизна. У роботі вперше здійснено комплексний аналіз можливостей застосування поведінкових реакцій гідробіонтів як чутливих індикаторів токсичної дії у системах біологічного моніторингу. Запропоновано методологічні підходи до кількісної оцінки поведінкових параметрів, що підвищує об'єк-

тивність та відтворюваність результатів у порівнянні з традиційними якісними спостереженнями. Удосконалено підхід до функціонування біологічних систем раннього попередження шляхом інтеграції поведінкових тестів із цифровими технологіями відеоаналізу та алгоритмами статистичної обробки, що дозволяє мінімізувати кількість хибних тривог і підвищити надійність роботи систем.

Методологічне або загальнонаукове значення.

Дослідження формує новий методологічний підхід до використання поведінкових реакцій гідробіонтів у біомоніторингу, переводячи їх у площину кількісної оцінки та стандартизації. Інтеграція цифрових технологій і статистичних алгоритмів у біологічні системи раннього попередження підвищує точність та надійність екологічного контролю. Робота має загальнонаукове значення, оскільки сприяє розвитку поведінкової екотоксикології як перспективного наукового напрямку.

Викладення основного матеріалу. Створення сільськогосподарських угідь та промислових об'єктів поблизу прісноводних водойм та водотоків збільшило ризик хімічного забруднення озер та річок у різних країнах світу. Згідно з опитуванням, проведеним серед 153 постачальників води у Сполучених Штатах та Канаді, найпоширенішими причинами забруднення води були транспортні аварії, витоки з трубопроводів та резервуарів для зберігання, пестициди із сільськогосподарських стоків та патогенні мікроби, які потрапляють у водні об'єкти з неочищеними стічними водами [12]. Тільки в Онтаріо, Канада, у 2009 році було зареєстровано 1162 розливи у водні системи, з яких 595 випадків, як було підтверджено, спричинили значний вплив на навколишнє середовище [12]. Щоб пом'якшити вищезазначені ризики, Агентство з охорони навколишнього середовища США рекомендувало встановити системи раннього попередження, оснащені онлайн-датчиками, для швидкого виявлення будь-яких шкідливих агентів, включаючи хімічні забруднювачі. Однак, сучасні хімічні сенсори все ще стикаються з низкою технологічних та логістичних обмежень, включаючи нездатність виявляти широкий спектр забруднюючих речовин [13], і тому оцінка безпеки води повинна проводитися безпосередньо на водному об'єкті в режимі реального часу.

Щоб доповнити недоліки сучасних технологій хімічного зондування, водні організми можуть бути використані як компоненти системи онлайн-моніторингу для виявлення наявності токсичних хімічних речовин. Подібно до шахтарської канарки, ці організми демонструють швидкі зміни у своїх фізіологічних та поведінкових кінцевих точках при впливі підгострих, швидкодіючих токсикантів [14]. Коли кінцеві точки демонструють статистично значущі відхилення від базових умов, спрацьовує попереджувальний сигнал, щоб повідомити операторів безпеки води про небезпечну ситуацію, і можуть бути вжиті відповідні коригувальні дії. Різні дослідження оцінювали вико-

ристання риб [15–17], ветвистоусих ракоподібних [18, 19], двостулкових молюсків [20, 21] та водоростей [22, 23] для впровадження в різні системи біомоніторингу. Хоча ці дослідження продемонстрували чутливість організмів та їхню швидку реакцію на різні забруднювачі, вищезгадані експерименти тестували лише один тип організмів у відповідній системі біомоніторингу. Ефективна система раннього попередження не може покладатися виключно на один вид, оскільки різні організми можуть демонструвати різний рівень чутливості до одного й того ж забруднювача, також певний вид також може бути надмірно чутливим до природних коливань якості води. Виходячи з вищезазначених зауважень, система біомоніторингу одного виду може потенційно недооцінювати або переоцінювати ризики певних токсикантів.

Спираючись на численні види, можна створити більш надійну систему, яка мінімізує ймовірність хибнопозитивних або хибнонегативних результатів. Різні забруднюючі речовини також можуть викликати унікальну реакцію від кожного організму біомоніторингу, і дослідження, що аналізує різні моделі реакцій, потенційно може дозволити ідентифікувати невідомі забруднюючі речовини.

Системи раннього попередження особливо корисні для виявлення періодичних токсичних впливів у навколишньому середовищі. Безперервна інформація в режимі реального часу про зміни в часі рівнів токсичності важлива для фахівців з охорони навколишнього середовища, які повинні розуміти вплив точкових і неточкових джерел забруднення на водний об'єкт, оцінювати, чи є якість поверхневих вод придатною для використання, або розглядати, чи придатні стічні води з очисних споруд для скиду.

Головні висновки. Результати дослідження свідчать про те, що поведінкові реакції можуть бути сприятливими кінцевими точками для оцінки організмів та екологічних ефектів впливу забруднюючих речовин на навколишнє середовище. Порівняння тривалості дослідження, чутливості, розміру ефекту та статистичної потужності вказує на те, що поведінкові реакції повинні використовуватися ширше і подальші дослідження, повинні бути зосередженими на оптимізації та стандартизації протоколів, які оцінюють поведінку, були б корисними для галузі водної токсикології.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати мають широкі можливості для практичного застосування у сфері екологічного моніторингу та управління довкіллям. Запропоновані підходи до кількісної оцінки поведінкових реакцій гідробіонтів можуть стати основою для створення нових або вдосконалення наявних біологічних систем раннього попередження з метою оперативного контролю якості питної та поверхневої води. Інтеграція цифрових технологій та алгоритмів аналізу даних дозволяє підвищити чутливість і надійність таких систем, що робить їх

придатними для впровадження у практику промислових підприємств, комунального господарства, а також у державні системи екологічного контролю. Перспективним є також використання напрацьованих методик у навчальному процесі та підготовці

фахівців з екології, токсикології та біоінженерії. У ширшому контексті результати дослідження сприяють розвитку міжнародних стандартів у сфері екологічної безпеки та інтеграції України до світової системи моніторингу довкілля.

Література

1. ECHA, REACH – Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals Regulation – Registered Substances Factsheets, European Chemicals Agency. <https://echa.europa.eu/information-on-chemicals/registered-substances>
2. UNEP, U. (2019). Global Chemicals Outlook II-From Legacies to Innovative Solutions: Implementing the 2030 Agenda for Sustainable Development.
3. Persson L., Almroth B., Collins C. D., Cornell S., de Wit C. A., Diamond M. L., Fantke P., Hassellöv M., MacLeod M., Ryberg M. W., Jørgensen S. P., Villarrubia-Gómez P., Wang Z. Outside the safe operating space of the planetary boundary for novel entities. *Environ. Sci. Technol.*, 2022. 56(3). pp. 1510-1521. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04158>
4. UNEP. «Stockholm Convention on persistent organic pollutants (POPs) – Text of the Convention.» <https://www.pops.int/TheConvention/Overview/TextoftheConvention/tabid/2232/Default.aspx>
5. Ali H., Khan E., Ilahi I. Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of chemistry*, 2019. 1. pp. 1-14. <https://doi.org/10.1155/2019/6730305>
6. Briffa J., Sinagra E., Blundell R. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans, *Heliyon*. 2020. 6(9). pp. e04691. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691>
7. Wang Z., Cousins I.T., Scheringer M., Hungerbuehler K. Hazard assessment of fluorinated alternatives to long-chain perfluoroalkyl acids (PFAAs) and their precursors: status quo, ongoing challenges and possible solutions. *Environ. Int.*, 2015. 75. pp. 172-179. https://doi.org/10.4149/neo_2015_022
8. González-Gaya B., Lopez-Herguedas N., Bilbao D., Mijangos L., Iker A. M., Etxebarria N. Suspect and non-target screening: the last frontier in environmental analysis. *Anal. Methods*, 2021. 13(16). pp. 1876-1904. <https://doi.org/10.1039/d1ay00111f>
9. Muir D., Zhang X., de Wit C.A., Vorkamp K., Wilson S. Identifying further chemicals of emerging arctic concern based on 'in silico' screening of chemical inventories. *Emerging Contam.* 2019. 5. pp. 201-210. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2019.05.005>
10. Xiao H., Krauss M., Floehr T., Yan Y., Bahlmann A., Eichbaum K., Brinkmann M., Zhang X., Yuan X. Effect-directed analysis of aryl hydrocarbon receptor agonists in sediments from the Three Gorges Reservoir, China. *Environ. Sci. Technol.*, 2016. 50 (20). pp. 11319-11328. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03231>
11. European Commission. Study for the Strategy for a Non-toxic Environment of the 7th Environment Action Programme – Final Report Publications Office. 2017.
12. Ontario Ministry of the Environment, Spill Action Centre: 2009 Summary Report, 2010. 8 p. Spills Action Centre : 2009 summary report : Free Download, Borrow, and Streaming : Internet Archive
13. Storey M. V., van der Gaag B., Burns B. P. Advances in on-line drinking water quality monitoring and early warning systems. *Water Research*, 2011. 45(2), pp. 741-747. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.08.049>
14. van der Schalie W. H., James R. R., Gargan T. P. Selection of a battery of rapid toxicity sensors for drinking water evaluation. *Biosensors and Bioelectronics*, 2006. 22(1). pp. 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2005.11.019>
15. Wei D., Wang L., Poopal R.-K., Ren Z. IR-based device to acquire real-time online heart ECG signals of fish (*Cyprinus carpio*) to evaluate the water quality. *Environmental Pollution*, 2023. 337. pp. 122564. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122564>
16. Kane A. S., Salierno J. D., Brewer, S. K. Fish models in behavioral toxicology: automated techniques, updates and perspectives. *Methods in aquatic toxicology*, 2005. 2. pp. 559-590. https://www.researchgate.net/publication/300020483_Fish_models_in_behavioral_toxicology
17. Little E. E., Fairchild J. F., DeLonay A. J. Behavioral methods for assessing impacts of contaminants on early life stage fishes. *In American Fisheries Society Symposium*. 1993. 14. pp. 67-76.
18. Gerhardt A., Carlsson A., Ressemann C. A new online biomonitoring system for *Gammarus pulex* (L.) (Crustacea): in situ test below a copper effluent in South Sweden. *Environ. Sci. Technol.*, 1998. Vol. 32 pp. 150-156. <https://doi.org/10.1021/es970442j>
19. Maradona A., Marshall G., Mehrvar M., Pushchak R., Laursen A. E., McCarthy L. H., Bostan V., Kimberley A. Utilization of multiple organisms in a proposed early-warning biomonitoring system for real-time detection of contaminants: preliminary results and modeling. *Journal of Hazardous Materials*, 2012. Vol. 219–220. pp. 95-102. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.03.064>
20. Amiard-Triquet C. Behavioral Disturbances: The Missing Link between Sub-Organismal and Supra-Organismal Responses to Stress? Prospects Based on Aquatic Research. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2009. Vol. 15(1). pp. 87–110. <https://doi.org/10.1080/10807030802615543>
21. Gerhardt A. Aquatic Behavioral Ecotoxicology-Prospect and Limitations. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2007. Vol. 13(3), pp. 481–491. <https://doi.org/10.1080/10807030701340839>
22. Twist H., Edwards A. C., Codd G. A. A novel in-situ biomonitor using alginate immobilised algae (*Scenedesmus subspicatus*) for the assessment of eutrophication in flowing surface waters. *Water Research*, 1997. 31(8). pp. 2066-2072. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00035-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00035-3)
23. van der Schalie W. H., Shedd T. R., Knechtges P. L., Widder M. W. Using higher organisms in biological early warning systems for real-time toxicity detection, *Biosensors and Bioelectronics*, 2001. 16(7–8). pp. 457-465. [https://doi.org/10.1016/S0956-5663\(01\)00160-9](https://doi.org/10.1016/S0956-5663(01)00160-9)

Дата першого надходження рукопису до видання: 08.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 21.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025