



УДК 911.8:504.054.05:556.531
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.13.2025.35>

АНАЛІЗ ДОСВІДУ ЗАСТОСУВАННЯ БІОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ РАНЬОГО ЗАПОБІГАННЯ ЗАБРУДНЕННЮ ВОД

О. М. Крайнюков¹, М. М. Щокіна²

Забруднення водних ресурсів є однією з найбільш критичних глобальних екологічних проблем сучасності, що має далекосяжні наслідки для біосфери та людства. Цей феномен характеризується зміною фізичних, хімічних і біологічних властивостей води, що робить її непридатною для споживання та порушує функціонування природних екосистем. Основними антропогенними джерелами забруднення є промислові стічні води, побутові стічні води, сільськогосподарська діяльність. Усе це створює значну загрозу для здоров'я екосистем і людей.

*Для оцінювання рівня забруднення та впливу поллютантів на біотичні системи застосовуються комплексні екотоксикологічні дослідження. Дафнії (*Daphnia magna*) визнані стандартною тест-моделлю в біотестуванні завдяки високій чутливості до змін якості води, короткому життєвому циклу та легкості культивування. Дослідження фокусуються не лише на показниках народжуваності та летальності, а й на модифікаціях рухової активності, яка є надзвичайно чутливим індикатором стресу. Методи аналізу включають відеомоніторинг і кількісне оцінювання параметрів плавання (швидкість, пройдена відстань, час нерухомості/активності, частота зміни напрямку, просторовий розподіл, реакція на світло/темряву).*

Аналіз наукових публікацій підтверджує значний інтерес до поведінки дафній як алармної системи раннього попередження. Зміни у швидкості плавання, характері руху (хаотичні, тонучі рухи) або вертикальній міграції спостерігаються задовго до смертельних ефектів. Дослідження показують, що різні забруднювачі (важкі метали, барвники, мікропластик, гербіциди) спричиняють специфічні «поведінкові профілі», що дозволяє ідентифікувати механізми дії токсикантів на нервову чи ендокринну системи.

Виявлена висока кореляція між показниками плавальної поведінки та концентрацією забруднювачів підкреслює практичну значущість цих досліджень для біомоніторингу й екотоксикологічної оцінки водних ресурсів. Дафнії використовуються в моніторингових системах раннього біологічного попередження для експрес-тесту якості питної води. Зміни в їхній поведінці можуть мати каскадні ефекти на всю прісноводну екосистему, впливати на харчові мережі та функціонування водоемів. Це закладає основу для розроблення комплексної технології швидкого виявлення токсичності водного середовища.

Ключові слова: забруднення вод, біологічний моніторинг, токсичні властивості води, експрес-аналіз, біотестування, тест-об'єкт, чутливість організму.

¹ доктор географічних наук, професор,
професор кафедри екологічної безпеки та екологічної освіти
(Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, м. Харків)
e-mail: kraunukov@karazin.ua
ORCID: 0000-0002-5264-3118

² аспірантка кафедри екологічної безпеки та екологічної освіти
ННІ екології
(Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, м. Харків)
e-mail: m.shchokina@karazin.ua
ORCID: 0009-0003-2313-4036

ANALYSIS OF EXPERIENCE IN THE APPLICATION OF BIOLOGICAL SYSTEMS FOR EARLY WARNING OF WATER POLLUTION

O. M. Kraynyukov, M. M. Shchokina

Water pollution is one of the most critical global environmental problems of our time, which has far-reaching consequences for the biosphere and humanity. This phenomenon is characterized by a change in the physical, chemical and biological properties of water, which makes it unsuitable for consumption and disrupts the functioning of natural ecosystems. The main anthropogenic sources of pollution are industrial wastewater, domestic wastewater, agricultural activities. All this poses a significant threat to the health of ecosystems and people.

*Comprehensive ecotoxicological studies are used to assess the level of pollution and the impact of pollutants on biotic systems. Daphnia (*Daphnia magna*) is recognized as a standard test model in bioassays due to its high sensitivity to changes in water quality, short life cycle and ease of cultivation. Studies focus not only on fertility and mortality rates, but also on modifications of motor activity, which is an extremely sensitive indicator of stress. Analysis methods include video monitoring and quantitative assessment of swimming parameters (speed, distance traveled, immobility/activity time, frequency of direction changes, spatial distribution, response to light/darkness).*

Analysis of scientific publications confirms the considerable interest in the behavior of Daphnia as an early warning alarm system. Changes in swimming speed, movement pattern (chaotic, sinking movements) or vertical migration occur long before lethal effects. Studies show that different pollutants (heavy metals, dyes, microplastics, herbicides) cause specific "behavioral profiles", which allows to identify the mechanisms of action of toxicants on the nervous or endocrine systems.

The high correlation between swimming behavior and pollutant concentration was found, emphasizing the practical significance of these studies for biomonitoring and ecotoxicological assessment of water resources. Daphnia are used in early biological warning monitoring systems for rapid testing of drinking water quality. Changes in their behavior can have cascading effects on the entire freshwater ecosystem, affecting food webs and the functioning of the reservoir. This lays the foundation for the development of a comprehensive technology for rapid detection of aquatic toxicity.

Key words: water pollution, biological monitoring, toxic properties of water, rapid analysis, biotesting, test object, organism sensitivity.

Вступ

Забруднення поверхневих вод є однією із критичних глобальних проблем, що спричиняє деградацію водних екосистем, впливає на якість ґрунтових вод і безпеку питного водопостачання. Основними джерелами антропогенного впливу є промислові стоки, побутові відходи, сільськогосподарська діяльність. Ці чинники провокують низку негативних екологічних змін (Безсонний, 2023; Коніщук та ін., 2023), зокрема: зростання вмісту забруднювальних речовин у водних об'єктах, евтрофікацію, зниження рівня розчиненого кисню, руйнування природних середовищ існування для риб та інших гідробіонтів, що веде до зменшення біорізноманіття. Наслідки цих процесів створюють значну загрозу для здоров'я екосистем і людини, потребують комплексних підходів до управління водними ресурсами та посилення природоохоронних заходів.

Для оцінювання рівня забруднення водних об'єктів, визначення впливу полютантів на біотичні компоненти та кількісного оцінювання збитків, завданих рибному господарству, наукові спільноти застосовують комплексні дослідження та екотокси-

кологічні експерименти (Крайнюкова та ін., 2019; Anggayasti et al., 2024; Крайнюков та ін., 2024). У рамках біотестування (Крайнюкова та ін., 2020; Крайнюкова та ін., 2021; Шелюк та ін., 2024) для ідентифікації токсичних сполук у водному середовищі стандартною тест-моделлю визнано дафній (*Daphnia magna* Straus). Використання цих ракоподібних дозволяє ефективно оцінювати гостру та хронічну токсичність різноманітних забруднювальних речовин завдяки їхній високій чутливості до змін якості води, короткому життєвому циклу та легкій доступності для лабораторного культивування, що насамперед пов'язане з екотоксикологією та моніторингом навколишнього середовища.

Дафнії демонструють чутливість до змін гідрохімічних параметрів водного середовища не лише через показники народжуваності та летальності, а й через модифікації в їхній поведінці (Sandbacka et al., 2000). Рухова активність дафній є надзвичайно чутливим показником стресу, глибокий аналіз поведінки тварини дозволяє виявити закономірності реакцій, які можуть слугувати алармною системою (сигнальною

системою раннього попередження) для оцінювання токсичності середовища існування. Дослідження поведінкових реакцій, зокрема характеру плавання, швидкості пересування та вертикального розподілу цих організмів, надає додаткову інформацію щодо сублетального впливу полютантів, що є цінним для біомоніторингу й екотоксикологічного оцінювання водних ресурсів. Зміни у швидкості плавання, характері руху (наприклад, хаотичні рухи, тонучі рухи, зниження активності) або вертикальній міграції можуть виникати задовго до того, як з'являться смертельні чи репродуктивні ефекти. Деякі моніторингові системи раннього біологічного попередження використовують дафній для експрес-тесту якості питної води або поверхневих вод у реальному часі.

Дафнії широко використовуються у стандартизованих тестах на токсичність для оцінювання потенційної небезпеки нових та наявних хімікатів, пестицидів, фармацевтичних препаратів, важких металів, наночастинок і мікропластику (Litynska et al., 2021; Loboda & Daus, 2021; Shykhaleyeva & Kiryushkina, 2025). Дослідження рухової активності допомагають визначити сублетальні ефекти, тобто впливи, які не вбивають організм, але негативно позначаються на його поведінці, виживанні, рості та розмноженні. Різні забруднювачі можуть спричиняти специфічні зміни в руховій поведінці. Завдяки дослідженням цих «поведінкових профілів» учені можуть отримати уявлення про те, як саме окремий токсикант впливає на нервову, ендокринну системи або фізіологію дафній (Roex et al., 2001). Це допомагає ідентифікувати механізми дії забруднювачів.

Головне, що дафнії є ключовою ланкою у прісноводних харчових мережах, слугують важливою їжею для риб та інших водних організмів. Зміни в їхній руховій активності під впливом забруднення можуть мати каскадні ефекти на всю екосистему, впливати на доступність їжі, взаємодію хижака – жертва та загальне функціонування водойми.

Матеріал і методи

Для оцінювання дослідження впливу полютантів на біотичні системи, а також для вивчення досвіду застосування біологічних систем, які використовувалися для раннього запобігання забрудненню водних ресурсів, був застосований комплексний підхід до аналізу наукової літера-

тури українських і закордонних фахових видань (Мельнійчук та ін., 2021; Kovalchuk et al., 2021; Крайнюков та ін., 2022) щодо екотоксикологічних експериментів. Метод аналізу літературних джерел надав результат, який підтвердив інтерес науковців до поведінки дафній і те, що результати цих досліджень можна використовувати як системи раннього попередження. Наукова література, присвячена екотоксикологічному аналізу локомоторної активності дафній, характеризується значною різноманітністю методологічних підходів і тест-реакцій. Аналіз наукових публікацій також допоміг виявити великий обсяг проведених досліджень та методологічну різноманітність підходів до вивчення поведінкових патернів цих організмів.

Метааналіз – це кількісний метод, який часто є частиною систематичного огляду. Він допоміг об'єднати результати кількох досліджень, як-от: біотестування, екотоксикологічні дослідження, відеомоніторинг і кількісне оцінювання параметрів плавання, експериментальні методи. У результаті цей метод визначив, що дафнії (*Daphnia magna*) визнані стандартною тест-моделлю в біотестуванні для ідентифікації токсичних сполук у водному середовищі. Для оцінювання рівня забруднення та впливу полютантів на біотичні системи застосовувалися екотоксикологічні дослідження. Для аналізу рухової активності дафній використовувалися методи відеомоніторингу, а саме спеціалізована система “ZebraBox” та програмне забезпечення “ZebraLab”, а також цифрова система відстеження “Zantiks MWP”.

Наративний огляд наукових публікацій збирає та узагальнює літературу на основі знань, суб'єктивного вибору та досвіду, надає широкий, описовий огляд теми, окреслює ключові концепції, теорії та дебати.

Методом узагальнення та систематизації опановано інформацію щодо ключових аспектів застосування біологічних систем, зокрема дафній, для раннього запобігання забрудненню вод. Цей метод включає визначення дослідницького питання, критеріїв включення/виключення досліджень, методів пошуку, відбору й оцінювання якості статей.

Усі ці методи є інструментами, які допомагають працювати з величезним масивом наукової інформації, щоб зробити її зрозумілою, систематизованою та корисною для майбутнього використання.

Результати

Аналіз наукових публікацій, присвячених дослідженню поведінки дафній, свідчить про значний інтерес до цієї тематики в сучасному науковому середовищі. Виявлено великий обсяг проведених досліджень і значне методологічне різноманіття підходів до вивчення поведінкових патернів цих організмів.

Під впливом чинників, що перевищують гранично допустимі концентрації, зокрема важких металів, коливань температури, надлишку хімічних добрив, а також загальних змін фізико-хімічних показників водного середовища, у тестових об'єктах спостерігаються значні модифікації поведінкових патернів. Виявлені зміни охоплюють широкий спектр кінематичних і просторових характеристик, як-от: швидкість пересування, характер стрибкоподібних рухів (амплітуда та траєкторія), обертальні рухи, кути поворотів, загальна рухова активність, тривалість періодів руху, частота стрибків, зміни у виборі точок перебування в середовищі.

Наукова стаття (Abe et al., 2019) присвячена оцінюванню екологічної безпеки двох класів барвників, з використанням мікроракоподібних дафній як стандартного прісноводного організму, що широко застосовується в біоаналізах токсичності. Дослідження фокусується на порівняльному аналізі впливу синтетичного азобарвника Basic Red 51 (далі – BR₅₁), який повсюдно використовується в косметичній і текстильній промисловості, та природного барвника еритростомінону (далі – Ery), видобутого із грибів, що має потенційне промислове застосування. Основною метою було не лише визначення виживаності *D. magna*, але й оцінювання низки сублетальних і хронічних показників токсичності, зокрема поведінкових реакцій, інтенсивності дихання та репродуктивних параметрів.

Для визначення гострої токсичності барвників (BR₅₁, Ery та фотодegradованого Ery (далі – DEry)) було проведено експеримент із розрахунком 48-годинної медіанної ефективної концентрації (EC₅₀). Умови експерименту передбачали утримання дафній в 6-лункових планшетах, кожна з яких містила 10 мл тестового розчину. Щільність організмів становила 5 особин на лунку, водночас для кожної тестової обробки використовувалось 4 лунки (загалом n = 20 організмів на обробку). Аналіз поведінки *D. magna* здійснювався на 4-денних моло-

дих особинах із застосуванням спеціалізованої системи “ZebraBox” та програмного забезпечення “ZebraLab” (ViewPoint Life Science, Ліон (Франція)). Після 24-годинної експозиції до барвників дафнії індивідуально переміщувались у 24-лункові прозорі планшети, що містили 0,5 мл тестового розчину в кожній лунці.

Барвник BR₅₁ продемонстрував значне підвищення споживання кисню *D. magna* – на 14% за концентрації 0,02 мг/л, порівняно з контрольною групою, що вказує на активацію метаболічних процесів. Натомість вплив Ery та DEry не спричинив істотних змін у показниках споживання кисню.

Загальна локомоторна активність (пройдена відстань та швидкість плавання) дафній не була статистично значуще змінена під впливом жодного з досліджуваних барвників (Ery або BR₅₁ протягом 24-годинної експозиції).

Відповідно до очікуваних фізіологічних реакцій, дафнії демонстрували вищі показники швидкості та пройденої відстані у світлих циклах порівняно з темними, що зумовлено їхнім вираженим позитивним фототаксисом.

У кваліфікаційній роботі магістра (Котик, 2021) автор досліджує вплив іонів важких металів, зокрема Купруму (II) (Cu²⁺) та Феруму (II) (Fe²⁺), на поведінкові реакції представників роду *Daphnia*, надає екотоксикологічну оцінку експерименту. Застосовані методи біотестування, які включали культивування дафній, приготування тестових розчинів і відеомоніторинг з подальшим аналізом поведінки. Проведено кількісне оцінювання таких показників, як: швидкість плавання (середня або максимальна швидкість руху), пройдена відстань (сумарна дистанція, подолана організмом за визначений період), час нерухомості/активності (співвідношення періодів спокою і руху), частота зміни напрямку (кількість поворотів або різких змін траєкторії), просторовий розподіл (перевага окремих зон тестової ємності, наприклад, придонної, приповерхневої, центральної або периферичної), а також реакція на світло/темряву (фототаксис) (зміни активності або розподілу за зміни освітлення).

У результаті дослідження впливу катіонів важких металів, як-от Купрум (II) і Ферум (II), виявлено характерні зміни в поведінці дафній. За концентрації Cu²⁺ 0,01 мг/л за 15 хвилин спостерігалось суттєве зростання рухової активності – на 41,1% (p < 0,001).

Однак за 60 хвилин експозиції зафіксовано зниження даного показника на 5,3% ($p < 0,01$) порівняно з контрольною групою. За подальшого підвищення концентрації токсиканта та тривалості експерименту (на 60 хвилині) дафнії ставали менш активними, демонстрували зменшення швидкості плавання та пройденої відстані. Починаючи із 60-ї хвилини експозиції в деяких дафній спостерігалася реакція обертання, а за 24 години рухи всіх тварин набули переважно характеру хаотичних обертань. Окрім того, у забрудненій воді дафнії змінювали свій звичний вертикальний розподіл у товщі води, уникали поверхневих або придонних шарів. Отримані результати чітко демонструють, що іони Купруму (II) та Феруму (II) мають виражений екотоксикологічний вплив на поведінкові реакції дафній. Виявлені зміни в руховій активності, швидкості плавання, пройденої відстані, частоті змін напрямку та просторовому розподілі вказують на стресовий вплив цих важких металів.

У роботі (Magester et al., 2021) досліджено вплив мікропластику на забруднення екосистеми водойм, а саме розглянуто поведінку та життєдіяльність дафній. Деякі мікропластики залишаються у водному стовпі, тоді як важчі осідають на дно. Обидва ці сценарії створюють загрозу для водних організмів, що живуть як у товщі води, так і в бентосній зоні. Дафнії, будучи фільтраторами, можуть поглинати мікропластик (розміром до 30 мкм), оскільки ці частинки перебувають у діапазоні розмірів їхньої їжі, вони не можуть відрізнити їх від звичайних частинок їжі. Дослідження показало, що мікропластик, що осідає, призводить до зменшення швидкості плавання *Daphnia magna* під час вертикальних траєкторій. У разі, коли присутній лише мікропластик, траєкторії плавання дафній вказували на серйозний стрес і дезорієнтацію організмів: особини змінювали локомоторні функції на стрибаючі та тонучі рухи. Це демонструє сублетальні (не смертельні, але шкідливі) ефекти мікропластику на цих організмів. Окрім змін у поведінці, мікропластик також знижував ріст тіла та показники виживання дафній.

Рухова поведінка *Daphnia magna* змінювалася під впливом мікропластику так: дафнії, що піддавалися впливу мікропластику, що осідає, продемонстрували зменшення швидкості плавання під час своїх типових вертикальних траєкторій. Це вказує на упо-

вільнення їхнього руху. У присутності лише мікропластику траєкторії плавання дафній змінювалися. Замість звичайних вертикальних рухів вони демонстрували стрибаючі та тонучі рухи. Зміни в руховій поведінці дафній, зокрема їхні рухи вниз (тонучі рухи), можуть сприяти переміщенню мікропластику, який зазвичай залишався б у верхніх шарах води завдяки своїй плавучості, до глибших шарів водного стовпа або на дно. У статті акцентовано увагу на тому, що мікропластик спричиняє сублетальні зміни у звичній руховій поведінці дафній, що проявляється як у зміні швидкості плавання, так і в характері їхніх траєкторій руху.

У науковій праці (Qin et al., 2025) досліджено токсичний вплив гербіциду Діурону (DCMU) на плавальну поведінку прісноводних рачків *Daphnia magna*. Головна мета дослідження – розробити швидкий і чутливий метод виявлення токсичності води на основі змін у швидкості плавання дафній. У процесі експерименту дафнії піддавалися короткочасній дії різних концентрацій Діурону, як сублетальних (які не вбивають), так і летальних (смертельні) концентрацій. Основним методом дослідження були безперервне спостереження і аналіз середньої швидкості плавання дафній. Цей новий підхід порівнювався із традиційним 48-годинним статичним тестуванням на токсичність для оцінювання його чутливості та придатності для швидкого виявлення. Було виявлено, що середня швидкість плавання дафній прогресивно зменшувалася із часом експерименту, незалежно від концентрації Діурону (чи була вона сублетальною, чи летальною). За летальних концентрацій Діурону початкова швидкість плавання була вищою, ніж за сублетальних концентрацій, що може свідчити про стимульовану або прискорену реакцію на токсикант. Поведінкові показники плавання дафній є більш чутливими до впливу Діурону вже після 5 хвилин порівняно із традиційними методами, що робить їх придатними для швидкого виявлення токсичності. Виявлено високу кореляцію між показником швидкості плавання та концентрацією впливу. Дослідження закладає основу для розроблення комплексної технології швидкого виявлення токсичності водного середовища, базуючись на токсичній реакції показників плавальної поведінки дафній.

У статті (Artells et al., 2013) досліджено вплив наночастинок діоксиду церію (CeO_2 NPs) на виживаність та плавальну здат-

ність двох видів дафній: *Daphnia similis* та *Daphnia pulex*.

Виявлено, що наночастинки CeO_2 по-різному та значно впливають на швидкість плавання обох видів дафній, змушують їх плавати повільніше. Наприклад, після 48 годин впливу 1 мг/л наночастинок швидкість плавання зменшилася на 30% у *D. pulex* та на 40% у *D. similis*. За вищих концентрацій вплив на *D. similis* був сильнішим. Відмінності в токсичних ефектах CeO_2 NPs між видами пояснюються морфологічними особливостями. *D. similis* має більший дистальний шип (0,6–1 мм) та багато дрібних шипів на кутикулі, тоді як *D. pulex* має коротший дистальний шип (0,10–0,25 мм) та лише кілька шипів. Ці морфологічні особливості діють як «пастки» для агрегатів наночастинок CeO_2 , що призводить до більшого накопичення частинок на щитку *D. similis*. Під час плавання *D. similis* накопичені частинки утворювали «хмару» за дистальним шипом.

Наночастинки діоксиду церію (CeO_2 NPs) значно впливають на плавальну здатність обох досліджуваних видів дафній (*Daphnia similis* та *Daphnia pulex*), призводять до зниження швидкості плавання. Це свідчить про негативний вплив на локомоторні функції.

У дослідженні (Saalman et al., 2025) було детально вивчено вплив трьох інсектицидів (імідаклоприду, тіаклоприду та фіпронілу) на різні аспекти поведінки дафній.

Дослідники сфокусувалися на таких поведінкових кінцевих точках, з використанням цифрової системи відстеження “Zantiks MWP”. Локомоторні параметри (плавальна активність) урахували час активності та використання площі. Відсоток часу від загального спостереження, протягом якого дафнія активно рухалася, дозволив оцінити загальний рівень активності. Площа, яку дафнія охоплювала під час плавання, допомогла виявити аномальні траєкторії руху, як-от обертальні рухи. Ці параметри вимірювалися в темряві, щоб виключити вплив світла. Дослідження мало на меті встановити чутливі та застосовні поведінкові кінцеві точки, а також оцінити їхню чутливість до впливу інсектицидів за короткочасного (48 годин) і довгострокового (14 днів) впливу. Особлива увага приділялася ефектам покоління, досліджувались поведінкові зміни в новонароджених дафній покоління F1, що народилися від батьків, які перебували під впливом інсектицидів.

Поведінкові зміни спостерігалися за значно нижчих концентрацій інсектицидів і корот-

шому часі впливу порівняно із класичними кінцевими точками (імобілізація, розмноження), рекомендованими ОЕСР. У результаті експерименту виявлено, що статистично значущі поведінкові ефекти були у 20 разів нижчими для імідаклоприду, у 10 разів нижчими для тіаклоприду та у 156 разів нижчими для фіпронілу, ніж відповідні NOEC (концентрація, що не спричиняє спостережуваного ефекту) для імобілізації. Це підтверджує, що поведінкові реакції є чутливими сигналами раннього оповіщення про сублетальні ефекти забруднювачів.

Зміни в поведінці, як-от гіперактивність або порушення орієнтації, можуть впливати на пристосованість дафній, їхню здатність уникати хижаків, знаходити їжу та, зрештою, на виживання популяції та перенесення енергії в харчовій мережі. Це підкреслює важливість включення поведінкових кінцевих точок в оцінку екологічного ризику.

У статті (Di Nica et al., 2021) досліджено поведінкові реакції молодих *Daphnia magna* на вплив двох фосфорорганічних інсектицидів: хлорпірифосу (CPF) та хлорпірифос-метилу (CPF-m). У дослідженні оцінюються та порівнюються поведінкові реакції плавання (далі – BSRs) цих ракоподібних за впливу рівноєфективних і сублетальних концентрацій обох сполук протягом різного часу експозиції. Використовувався відеомоніторинг (video tracking analysis) для оцінювання поведінкових реакцій. Вимірювання проводилися після 24 та 48 годин експерименту. Було оцінено такі поведінкові параметри, як пройдена відстань, середня швидкість, активний час і середнє прискорення. Автори описують зміни в поведінкових реакціях плавання дафній під впливом інсектицидів, зафіксовано значні зміни в поведінці під час плавання, які залежать від концентрації інсектицидів і тривалості.

Перші 24 години обидва інсектициди (хлорпірифос і хлорпірифос-метил) призводили до зниження плавальної активності (гіпоактивності). Хлорпірифос мав більш виражений ефект, ця гіпоактивність пов'язувалась з наркотичними ефектами інсектицидів.

За 48 годин спостерігалось зворотнє явище – збільшення параметрів плавання, особливо внаслідок вищих концентрацій. Хлорпірифос-метил, зокрема, спричиняв значні відхилення порівняно з контрольними групами. Це може бути пов'язано з активацією компенсаторних механізмів дафній, як-от посилене годування, пошукова поведінка або уникнення.

Було помічено, що BSRs є чутливими показниками сублетального стресу, демонструють зміни, що залежать від концентрації та часу. Обидві сполуки спричиняли зниження плавальної активності (гіпоактивність), до того ж CPF мав більш виражений ефект.

Результати свідчать, що поведінкові реакції плавання є вимірними активними відповідями організмів, на які впливає тривалентність впливу токсикантів.

Обговорення

Практичне значення досліджень поведінкових реакцій дафній полягає в розробленні швидких і ефективних методів моніторингу якості води. З огляду на ключову роль дафній у прісноводних харчових мережах, зміни в їхній поведінці під впливом забруднення мають каскадні наслідки для всієї екосистеми, впливають на доступність їжі та загальне функціонування водойм. Отже, вивчення локомоторних реакцій дафній є фундаментальним для розуміння екоотоксикологічних процесів і розроблення стратегій захисту водних ресурсів.

Наявна наукова література, де висвітлено екоотоксикологічний аналіз локомоторної активності дафній, характеризується значним розмаїттям методологічних підходів і тест-реакцій. Проте значна варіативність алгоритмів проведення цих тестів нині обмежує їх широке уніфіковане застосування. Подальше збільшення числа апробацій і верифікацій уже розроблених методів тестування сприятиме стандартизації експериментальних протоколів і підвищенню достовірності одержуваних даних, що забезпечить їхню надійність для практичного використання. Незважаючи на поточні методологічні виклики, існування численних високочутливих підходів для дослідження поведінкових патернів *Daphnia* у відповідь на широкий спектр хімічних речовин підкреслює значний потенціал цих організмів як біоіндикаторів токсичності довкілля та їх перспективне практичне застосування в екологічному моніторингу.

Для ефективного використання біологічних систем як інструменту раннього запобігання забрудненню води планується провести емпіричне дослідження. Метою цього дослідження є визначення специфічних «поведінкових профілів» живих організмів у відповідь на різні типи забруднень, зокрема на важкі метали, барвники, мікропластик і гербіциди. На основі отриманих результатів буде розроблено математичну модель. Ця

модель стане основою для цифрової системи відстеження забруднення води, яка дозволить оперативно виявляти небезпечні речовини в режимі реального часу.

Висновки

Отже, дослідження підкреслюють критичну роль забруднення поверхневих вод як глобальної проблеми, що деградує водні екосистеми та ставить під загрозу питне водопостачання. Основними джерелами цього забруднення є промислові, побутові та сільськогосподарські стоки, які спричиняють цілу низку негативних екологічних змін, зокрема евтрофікацію, зниження рівня розчиненого кисню та втрату біорізноманіття. Для ефективного оцінювання забруднення та його впливу на біотичні компоненти екосистем дафнії визнані ідеальною тест-моделлю в біотестуванні. Їхня висока чутливість до змін якості води, короткий життєвий цикл і легкість культивування роблять їх незамінними для оцінювання гострої та хронічної токсичності різноманітних забруднювальних речовин. Найважливішим аспектом, висвітленим в оглядових статтях, є чутливість поведінкових реакцій дафній до стресу. Зміни в їхній руховій активності, швидкості плавання, характері руху (наприклад, хаотичні або тонучі рухи) та вертикальному розподілі є надзвичайно чутливими показниками сублетального впливу забруднювачів. Ці поведінкові аномалії є важливими індикаторами стресового стану організмів і можуть бути використані для оцінювання токсичності й екологічного стану водних екосистем, такі зміни можуть бути виявлені задовго до того, як з'являться смертельні чи репродуктивні ефекти, що дозволяє використовувати дафній як алармну (сигнальну) систему раннього попередження для оцінювання токсичності водного середовища.

На основі викладеного було визначено необхідність розроблення ефективної системи раннього запобігання забрудненню води за допомогою біологічних систем. Заплановано проведення експериментальних досліджень, щоб установити, як саме окремі забруднювачі (важкі метали, барвники, мікропластик, гербіциди) впливають на рухову активність організмів, спричиняють унікальні поведінкові реакції. Отримані дані будуть використані для створення математичної моделі, яка ляже в основу цифрової системи моніторингу забруднень. Отже, кінцевий результат матиме практичне застосування.

Список використаної літератури

- Безсонний В.А. Використання ентропійного підходу в системах моніторингу водних ресурсів. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна*. Серія «Геологія. Географія. Екологія». 2023. Вип. (58). Р. 302–320. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-23>.
- Коніщук В.В., Шумидай І.В., Мартиненко В.В. Екологічний та гідрохімічний аналіз річок природного заповідника «Древлянський» (Україна). *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна*. Серія «Геологія. Географія. Екологія». 2023. Вип. 58. С. 336–349. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-25>.
- Котик С.Р. Зміни поведінкових реакцій *Daphnia spp.* при забрудненні води катіонами Купруму (II) та Феруму (II) : кваліфікаційна робота магістра за спеціальністю «Біологія». Запоріжжя : Запорізький національний університет, 2021. 60 с.
- Крайнюкова А.М., Крайнюков О.М., Кривицька І.А. Вивчення залежності токсичного ефекту від часу контакту токсикантів з культурою водорості. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна*. Серія «Екологія». 2019. Вип. 21. С. 72–80. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2019-21-06>.
- Крайнюкова А.М., Крайнюков О.М., Кривицька І.А. Використання методик біотестування для оцінювання екологічного стану поверхневих вод. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна*. Серія «Екологія». 2021. Вип. 24. С. 103–116. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2021-24-09>.
- Крайнюкова А.М., Крайнюков О.М., Кривицька І.А. Використання фотосинтетичної активності водоростей задля оцінки токсичності з метою створення портативного пристрою. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна*. Серія «Екологія». 2020. Вип. 22. С. 82–92. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2020-22-08>.
- Крайнюков О.М., Кривицька І.А., Найдьонова О.Є. Алгоритм оцінюванню базового набору таксонів задля визначення їх ефективності. *Український журнал природничих наук*. 2024. Вип. 8. С. 252–269. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.26>.
- Крайнюков О.М., Кривицька І.А., Крайнюкова А.М., Lineman M. Проблема оцінювання економічних наслідків хімічного забруднення поверхневих вод. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна*. Серія «Екологія». 2022. Вип. 26. Р. 89–101. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2022-26-08>.
- Мельничук М.М., Горбач В.В., Горбач Л.М. Особливості використання водних ресурсів Волинської області та їх екологічний стан у сучасних умовах. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна*. Серія «Геологія. Географія. Екологія». 2021. Вип. (54). Р. 306–315. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-54-23>.
- Шеляк Ю.С., Махневич Д.С., Солонько О.С. Фітопланктон малої річки як показник якості вод в умовах змін клімату та воєнних дій на території України. *Український журнал природничих наук*. 2024. № 10. 286 с. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.10.2024.2>.
- Abe F.R., Machado A.L., Soares A.M.V.M., de Oliveira D.P., Pestana J.L.T. Life history and behavior effects of synthetic and natural dyes on *Daphnia magna*. *Chemosphere*. 2019. Vol. 236. P. 124390. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124390>.
- Anggayasti W.L., Sudaryanti S., Pertiwi M., Nurjannah R.S.F., Sheviyandini T.Y., Suryatama J., Rubiyatadji R., Koentjoro M.P., Kurniawan A. Identifying the distribution and source of riverine plastic waste contamination: case study of Brantas River in Malang city. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 5 (10 (131)). P. 37–44. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313830>.
- Artells E., Issartel J., Auffan M., Borschneck D., Thill A. et al. Exposure to Cerium Dioxide Nanoparticles Differently Affect Swimming Performance and Survival in Two Daphnid Species. *PLoS ONE*. 2013. № 8 (8). P. e71260. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0071260>
- Di Nica V., Rizzi C., Finizio A., Ferraro L., Villa S. Behavioural responses of juvenile *Daphnia magna* to two organophosphorus insecticides. *Journal Of Limnology*. 2022. Vol. 81. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2021.2015>.
- Kovalchuk I.P., Martyniuk V.O., Šeirienė V. The basin-landscape approach to the protection and condition optimization of the lakes of the national parks. *Visnyk of V N. Karazin Kharkiv National University*. Series “Geology. Geography. Ecology”. 2021. Vol. 53. P. 239–254. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-53-18>
- Litynska M., Dontsova T., Yanushevska O., Tarabaka V. Development of iron-containing sorption materials for water purification from arsenic compounds. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 2 (10 (110)). P. 35–42. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.230216>.

Loboda N., Daus M. Development of a method of assessment of ecological risk of surface water pollution by nitrogen compounds. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 5 (10 (113)). P. 15–25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.243058>.

Magester S., Barcelona A., Colomer J., Serra T. Vertical distribution of microplastics in water bodies causes sublethal effects and changes in *Daphnia magna* swimming behavior. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021. Vol. 228. P. 113001. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113001>.

Qin F., Zhao N., Yin G., Luo Y., Gan T. Toxicity Response and Swimming Speed Regularity in *Daphnia magna* After Short-Term Exposure to Diuron. *Toxics*. 2025. Vol. 13. № 5. P. 395. <https://doi.org/10.3390/toxics13050395>.

Roex W.M. et al. Reproductive Impairment in the Zebrafish, *Danio rerio*, upon Chronic Exposure to 1, 2, 3-Trichlorobenzene. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2001. Vol. 48. Issue 2. P. 196–201. <https://doi.org/10.1006/eesa.2000.2029>.

Saalmann V.F., Germing K., Ringbeck B., Kosak L.A., Eilebrecht E. Behavioral endpoints and generational effects in *Daphnia magna* upon short- and long-term exposure and their use as additional endpoint in ecotoxicological risk assessment. *Ecotoxicology and Environmental Safety : science direct Journals & Books*. 2025. Vol. 301. P. 118432. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118432>.

Sandbacka M. et al. The acute toxicity of surfactants on fish cells, *Daphnia magna* and fish – A comparative study. *Toxicology in Vitro*. 2000. Vol. 14. Issue 1. P. 61–68. [https://doi.org/10.1016/S0887-2333\(99\)00083-1](https://doi.org/10.1016/S0887-2333(99)00083-1).

Shykhaleyeva G.M., Kiryushkina G.M. Accumulation of heavy metals (Cu, Cr, Pb, Cd) in aquatic invertebrates from the hyperhaline Kuyalnyk estuary (Ukraine, North-Western Black Sea region). *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series “Ecology”*. 2025. Vol. 32. P. 124–133. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2025-32-09>.

References

Bezsonnyi, V. (2023). Viktoristannya entropiyного pidhodu v sistemah monitoringu vodnih resursiv [Use of the entropy approach in water resource monitoring systems]. *Visnik Harkivskogo natsionalnogo universitetu imeni V.N. Karazina. Seriya “Geologiya. Geografiya. Ekologiya” [Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology]*, 58, 302–320. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-23> [in Ukrainian].

Konishchuk, V., Shumyhai, I., & Martynenko, V. (2023). Ekologichniy ta gidrohimichniy analiz richok prirodnoho zapovidnika “Drevlyanskiy” [Ecological and hydrochemical analysis of the rivers Drevlianskiy] nature reserve (Ukraine). *Visnik Harkivskogo natsionalnogo universitetu imeni V.N. Karazina. Seriya “Geologiya. Geografiya. Ekologiya” [Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology]*, 58, 336–349. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-25> [in Ukrainian].

Kotyk, S.R. (2021). Zmini povedinkovih reaktsiy *Daphnia* spp. pri zabrudnenni vodi kationami Kuprumu (II) ta Ferumu (II) [Changes in behavioral reactions of *Daphnia* spp. when water is contaminated with copper (II) and iron (II)] *kvalifikatsiyna robota magistra za spetsialnistyu “Biologiya” / Kotyk S.R.; kerivnik: Gorohovskiy E.Yu. Zaporizhzhya: Zaporizkiy natsionalniy universitet [cations: master’s thesis in the specialty “Biology” / Kotyk S.R.; supervisor: Gorokhovskiy E.Yu. Zaporizhzhia: Zaporizhzhya National University]*, 60 p. [in Ukrainian].

Krainiukova, A.M., Krainiukov, O.M., & Kryvytska, I.A. (2019). Vivchennya zalezhnosti toksichnogo efektu vid chasu kontaktu toksikantiv z kulturoyu vodorosti [Studying the Dependence of the Toxic Effect on the Time of the Toxicant’s Contact with the Algae Culture]. *Visnik Harkivskogo natsionalnogo universitetu imeni V.N. Karazina. Seriya “Geologiya. Geografiya. Ekologiya” [Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology]*, 21, 72–80. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2019-21-06> [in Ukrainian].

Krajnjukova, A.M., Krajnjukov, O.M., & Kryvytska, I.A. (2021). Viktoristannya metodik biotestuvannya dlya otsinyuvannya ekologichnogo stanu poverhnevih vod [The use of biotesting techniques to assess the ecological status of surface waters]. *Visnik Harkivskogo natsionalnogo universitetu imeni V.N. Karazina. Seriya “Geologiya. Geografiya. Ekologiya” [Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology]*, 24, 103–116. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2021-24-09> [in Ukrainian].

Krainyukova, A.M., Krainyukov, O.M., & Krivitska, I.A. (2020). Viktoristannya fotosintetichnoyi aktivnosti vodorostey zadlya otsinki toksichnosti z metoyu stvorenniya portativnogo pristroyu [Victimization of photosynthetic activity of algae to assess toxicity using a portable device]. *Visnik*

Harkivskogo natsionalnogo universitetu imeni V.N. Karazina. Seriya "Geologiya. Geografiya. Ekologiya" [Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology], 22, 82–92. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2020-22-08> [in Ukrainian].

Krainyukov, O., Krivitska I., & Naidyonova O. (2024). Algoritm otsynuvannyu bazovogo naboru taksoniv zadlya viznachennya yih efektyvnosti [Algorithm for evaluating a basic set of taxa to determine their effectiveness]. *Ukrayinskiy zhurnal prirodnichih nauk [Ukrainian Journal of Natural Sciences]*, 8, 252–269. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.26> [in Ukrainian].

Krainiukov, O.M., Kryvytska, I.A., Krainiukova, A.M., & Lineman, M. (2022). Problema otsynuvannya ekonomichnih naslidkiv himichnogo zabrudnennya poverhnevih vod [The problem of assessing the economic consequences from chemical pollution of surface water]. *Visnik Harkivskogo natsionalnogo universitetu imeni V.N. Karazina. Seriya "Geologiya. Geografiya. Ekologiya" [Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology]*, 26, 89–101. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2022-26-08> [in Ukrainian].

Melniychuk, M., Gorbach, V., Gorbach, L. (2021). Osoblivosti vikoristannya vodnih resursiv Volynskoyi oblasti ta yih ekologichnyi stan u suchasni umovah [The peculiarities of using water resources at the Volyn region and their ecological state in the modern conditions]. *Visnik Harkivskogo natsionalnogo universitetu imeni V.N. Karazina. Seriya "Geologiya. Geografiya. Ekologiya" [Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology]*, 54, 306–315. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-54-23> [in Ukrainian].

Shelyuk, Yu.S., Makhnevich, D.S., Solonko, O.S. (2024). Fitoplankton maloyi richki yak pokaznik yakosti vod v umovah zmin klimatu ta voennih diy na teritoriyi Ukrayini [Phytoplankton of a small river as an indicator of water content in the aftermath of climate change and military operations on the territory of Ukraine]. *Ukrayinskiy zhurnal prirodnichih nauk [Ukrainian Journal of Natural Sciences]*, 10, 286 p. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.10.2024.2> [in Ukrainian].

Abe, F.R., Machado, A.L., Soares, A.M.V.M., de Oliveira, D.P., & Pestana, J.L.T. (2019). Life history and behavior effects of synthetic and natural dyes on *Daphnia magna*. *Chemosphere*, 236, 124390. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124390> [in English].

Anggayasti, W.L., Sudaryanti, S., Pertiwi, M., Nurjannah, R.S.F., Sheviyandini, T.Y., Suryatama, J., Rubiyatadji, R., Koentjoro, M., & Kurniawan, A. (2024). Identifying the distribution and source of riverine plastic waste contamination: case study of Brantas River in Malang city. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (10 (131)), 37–44. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313830> [in English].

Artells, E., Issartel, J., Auffan, M., Borschneck, D., & Thill, A., et al. (2013). Exposure to Cerium Dioxide Nanoparticles Differently Affect Swimming Performance and Survival in Two Daphnid Species. *PLoS ONE*, 8 (8), e71260. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0071260> [in English].

Di Nica, V., Rizzi, C., Finizio, A., Ferraro, L., & Villa, S. (2022). Behavioural responses of juvenile *Daphnia magna* to two organophosphorus insecticides. *J. Limnol.* 81: 2015. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2021.2015> [in English].

Kovalchuk, I.P., Martyniuk, V.O., & Šeirienė, V. (2020). The basin-landscape approach to the protection and condition optimization of the lakes of the national parks. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, 53, 239–254. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-53-18> [in English].

Litynska, M., Dontsova, T., Yanushevska, O., & Tarabaka, V. (2021). Development of iron-containing sorption materials for water purification from arsenic compounds. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (10 (110)), 35–42. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.230216> [in English].

Loboda, N., & Daus, M. (2021). Development of a method of assessment of ecological risk of surface water pollution by nitrogen compounds. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (10 (113)), 15–25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.243058> [in English].

Magester, S., Aina Barcelona, A., Colomer, J., Serra, T. (2021). Vertical distribution of microplastics in water bodies causes sublethal effects and changes in *Daphnia magna* swimming behavior. *Ecotoxicology and Environmental Safety : science direct Journals & Books*, 228, 113001, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113001> [in English].

Qin, F., Zhao, N., Yin, G., Luo, Y., & Gan, T. (2025). Toxicity Response and Swimming Speed Regularity in *Daphnia magna* After Short-Term Exposure to Diuron. *Toxics*, 13 (5): 395. <https://doi.org/10.3390/toxics13050395> [in English].

Roex, W.M., et al. (2001). Reproductive Impairment in the Zebrafish, *Danio rerio*, upon Chronic Exposure to 1, 2, 3-Trichlorobenzene. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 48 (2), 196–201. <https://doi.org/10.1006/eesa.2000.2029> [in English].

Saalmann, V.F., Germing, K., Ringbeck, B., Kosak, L.A., Eilebrecht, E. (2025). Behavioral endpoints and generational effects in *Daphnia magna* upon short- and long-term exposure and their use as additional endpoint in ecotoxicological risk assessment. *Ecotoxicology and Environmental Safety: science direct Journals & Books*, 301, 118432, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118432> [in English].

Sandbacka, M., et al. (2000). The acute toxicity of surfactants on fish cells, *Daphnia magna* and fish – A comparative study. *Toxicology in Vitro*, 14 (1), 61–68. [https://doi.org/10.1016/S0887-2333\(99\)00083-1](https://doi.org/10.1016/S0887-2333(99)00083-1) [in English].

Shykhaleyeva, G.M., & Kiryushkina, G.M. (2025). Accumulation of heavy metals (Cu, Cr, Pb, Cd) in aquatic invertebrates from the hyperhaline Kuyalnyk estuary (Ukraine, North-Western Black Sea region). *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology*, 32, 124–133. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2025-32-09> [in English].

Отримано: 24.07.2025

Прийнято: 28.08.2025

Опубліковано: 17.10.2025

