

DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2025-33-13>
УДК 556. 532 (477-924-52)

О. М. КРАЙНЮКОВ¹, д-р географ. наук, проф.,
професор кафедри екології та менеджменту довкілля
e-mail: kraynukov@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5264-3118>

М. М. ЩОКІНА¹,
Аспірантка
e-mail: m.shchokina@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-2313-4036>
¹Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
майдан Свободи, 4, м. Харків, Україна, 61022

ЗАСТОСУВАННЯ БІОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ РАНЬОГО ПОПЕРЕДЖЕННЯ: ВПРОВАДЖЕННЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО ПІДХОДУ ДО МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ВОД

Мета. Проведення аналізу набутого міжнародного досвіду з розробки та вдосконалення біологічних системи раннього попередження.

Методика. Оцінка спроможності вдосконалення існуючих біологічних систем раннього попередження для проведення безперервного моніторингу якості різних категорій вод.

Результати. Поведінкові реакції застосовувалися протягом десятиліть як інструменти для тестування водної токсичності, але їм приділялося набагато менше уваги, ніж дослідженням, що оцінюють летальність, розвиток або розмноження. Завдяки вдосконаленню візуальних і невізуальних інструментів оцінки та розширенню знань про важливість поведінки для здоров'я та фізичної форми організму інтерес до поведінкового аналізу зріс в останні роки. Однак, наскільки нам відомо, ніколи не проводилася кількісна оцінка доступних методів тестування токсичності організмів, тому неясно, чи є поведінкові дослідження цінним доповненням до моніторингу водного середовища. За результатами цього літературного огляду встановлено, що поведінкові дослідження є порівняно швидкими і чутливими, а тому заслуговують на подальшу увагу як інструменти для оцінки токсикологічних ефектів забруднювачів водного середовища. Ми вважаємо, що дослідження, спрямовані на розробку та оптимізацію методів поведінкового аналізу, можуть виявитися надзвичайно корисними для галузі токсикології, але майбутня робота має бути спрямована на визначення того, які конкретні моделі поведінки є найбільш чутливими до різних класів забруднювачів, а також на розуміння значущості змін у дискретній поведінці для впливу на здоров'я та фізичну форму організму.

Висновки. Біологічні системи раннього попередження (БСПО) здебільшого спираються на поведінкові реакції, деякі також оцінюють інші параметри, такі як вплив на флуоресценцію хлорофілу водоростей, на пікові рівні забруднення, з яких виводяться порогові значення. Зміни в поведінці є кращими за показники смертності та інші сублетальні реакції, оскільки вони усувають розрив між індивідуальною та популяційною релевантністю та є індикаторами значного впливу хімічного забруднення на популяцію перед більш серйозними наслідками (тобто зниженням чисельності популяції).

КЛЮЧОВІ СЛОВА: забруднення вод, токсичні властивості води, тест-об'єкт, біологічний моніторинг, біотестування, біологічні системи раннього попередження

Як цитувати: Крайнюков О. М., Щокіна М. М. Застосування біологічних систем раннього попередження: впровадження перспективного підходу до моніторингу якості вод. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2025. Вип. 33. С. 188-198. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2025-33-13>

In cites: Krainiukov, O. M., & Shchokina, M. M. (2025). Application of biological early warning systems: implementing a prospective approach to water quality monitoring. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology*, (33), 188-198. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2025-33-13> (in Ukrainian)

Вступ

Занепокоєння щодо наявності та виявлення токсичних агентів в екосистемах різко зросло в останні роки, зокрема у водному се-

редовищі. Забруднення води протягом тривалого часу оцінювалося лише за допомогою специфічних хімічних аналізів, але багаторіч-

ний досвід показав неадекватність такого підходу. Використання біологічних методів для оцінки забруднення води є важливою альтернативою, зокрема у випадках швидкого або дифузного забруднення, що є потенційними збудниками гострих отруєнь людини та небезпечного впливу на довкілля.

Для оцінки та моніторингу якості води може бути застосований ряд підходів, що базуються на великій різноманітності біоіндикаторів, таких як безхребетні, риби та водорості [1]. Чинні екотоксикологічні вимоги Директиви 79/831/ЄЕС для всіх нових промислових хімікатів полягають у тому, що випробування на гостру токсичність повинні проводитися з використанням риб та дафній [2]. Протягом багатьох років *Daphnia magna* Straus використовувалася як «стандартний» водний тестовий вид. Хронічні та гострі випробування з *D. magna* є одними з найчастіших досліджень у водній токсикології (ASTM, 1987, OECD, 1992, ЕЕС, 1992). Як модельний організм також часто використовується *Poecilia reticulata*, *Danio rerio*, оскільки їх легко утримувати та розводити в лабораторії [3].

Різні країни використовують тести на токсичність як частину своєї програми моніторингу якості води [4]. Спостерігається зростаючий інтерес як фахівців державних структур, так і промислових підприємств до використання біотестів для визначення токсичності хімічних сполук та промислових стічних вод. Цей інтерес відображається в розробці швидших, простіших та менш дорогих тестів з кількома організмами, які здатні виявляти негативну дію токсичних хімічних речовин.

Протягом останніх десятиліть було впроваджено багато методів для обмеження надходження різних токсичних хімічних речовин до води водних об'єктів задля досягнення унормованих показників якості води поверхневих водних об'єктів і захисту навколишнього природного середовища та здоров'я лю-

дини [5]. Мікрозабруднювачі, що визначаються як сполуки, зустрічаються в низьких концентраціях у водних екосистемах (від нг/л до мкг/л) та здатні негативно впливати на водні організми, становлячи значну частину небезпечних забруднюючих речовин [6]. Через їхню стійкість та полярність, велика різноманітність мікрозабруднювачів не може бути повністю усунена звичайними очисними спорудами [7, 8]. Таким чином, такі сполуки можна виявити у поверхневих водах і вони можуть мати негативний вплив на біологічні системи при потрапленні в навколишнє середовище [9].

Дотепер дослідження мікрозабруднювачів на очисних спорудах базуються на обмежених у часі тестах з використанням різних проб води. Лабораторні дослідження складаються з хімічного аналізу, частково доповненого екотоксикологічними біоаналізами різних апікальних кінцевих точок [10].

Біологічні системи раннього попередження (БСПО) на сьогодні переважно використовуються для безперервного моніторингу якості питної та поверхневої води [11]. Вони складаються з організму-індикатора, який демонструє оборотну реакцію на стрес від забруднюючих речовин у воді, методу вимірювання, який може кількісно реєструвати цю реакцію та програмного забезпечення, яке розраховує сигнал тривоги на основі згенерованих даних. На сьогодні доступний широкий спектр різних водних БСПО для різних застосувань та з тестовими організмами різних трофічних рівнів, такими як бактерії, водорості, безхребетні та хребетні [12-15]. Вони пропонують екологічно релевантні, чутливі, швидкі та неруйнівні параметри для моніторингу зміни складу та якості води [16].

Методика. Проведення аналізу міжнародного досвіду впровадження біологічних систем раннього попередження для проведення безперервного моніторингу якості різних категорій вод.

Результати та обговорення

За останні 30 років розроблено та використано багато водних організмів як індикаторів біологічного раннього попередження для моніторингу води водних об'єктів та зворотних вод та було запропоновано багато застосувань таких БСПО для безперервного автоматичного моніторингу протягом тривалих пері-

одів. Риби були найпривабливішими організмами, спочатку відібраними для БСПО, і вони продовжують залишатися популярним вибором [17, 18]. Інші організми включають ракоподібних [19, 20], двостулкових молосків [21, 22]. Крім того, для моніторингу токсичності використовувалися мікроорганізми, які час-

тіше асоціюються з біосенсорами. Прикладами можуть служити бактерії, найпростіші [23] і водорості [24].

Водорості *Chlorella vulgaris* часто використовуються як модельний організм у дослідженнях росту та пригнічення фотосинтезу, напівбезперервні вимірювання інгібування флуоресценції базуються на флуорометрії з імпульсно-амплітудною модуляцією (РАМ-флуорометрія) [25]. Процес вимірювання починається з визначення концентрації різних класів водоростей у стічних водах та їхньої активності, що вимірюється опосередковано за допомогою флуоресцентної активності водоростей. Потім визначають концентрацію *C. vulgaris* та активність класів водоростей для оцінки потенційного інгібування фотосинтетичної активності водоростей стічними водами. Подальше вимірювання, яке включає лише питну воду, використовується як контрольне значення. Цей процес повторюється кожні 30 хвилин зі свіжою суспензією водоростей, стічними водами та контрольною водою. Якщо інгібування флуоресценції перевищує раніше визначений поріг, спрацьовує сигнал тривоги.

Гаммарус пулекс (*Gammarus pulex*) зазвичай зустрічається в помірних потоках і належить до класу всеїдних подрібнювачів, відіграючи важливу роль у розкладанні грубої органічної речовини. *Gammarus pulex* все частіше використовується в екотоксикологічних експериментах та польових випробуваннях, включаючи оцінку харчової активності та поведінки.

У роботі [26] використовувався пристрій Remondis Aqua, який вимірював поведінку особин *G. pulex* за допомогою імпедансного методу. Організми поміщали у вісім циліндричних тестових камер з кришками, що закручуються в сітку. Оснащена чотирма електродами, одна пара електродів генерує високочастотну змінну напругу. Друга пара електродів вимірює зміни в електромагнітному полі, викликані рухами організму в сенсорній камері. Вимірюваним параметром є інтенсивність виявлених рухів (амплітуда), яка безперервно записується. Спеціальний алгоритм пристрою створює сигнали тривоги, виявляючи відмінності між нормальною та девіантною поведінкою в середньому русі особин. Якщо поведінка, а отже, і вимірне значення активності змінюється, короткострокове середнє значен-

ня реакції було швидше, ніж довгострокове середнє значення. Отже, різниця між обома середніми значеннями збільшується. Якщо поведінка була постійною, обидва середні значення були рівними, а різниця в ідеалі дорівнює нулю. Різниця всіх камер додається до суми сигналів тривоги. Сума сигналів тривоги збільшується, якщо зміна поведінки виявляється в кількох камерах одночасно. Для експерименту було відібрано вісім дорослих самців *G. pulex*, ідентифікованих за розташуванням пар передкопул та розміром понад 8 мм. Після цього в кожен тестову камеру було поміщено одну дорослу особину *G. pulex* разом із трьома листовими дисками як джерелом їжі. Усі організми замінювали щотижня.

Дафнія велика (*Daphnia magna*) як основний консумент планктону, що живиться фітопланктоном та бактеріями, є важливим джерелом їжі для організмів вищих трофічних рівнів і відіграє важливу роль в галузі екотоксикології для оцінки гострої та хронічної токсичності, а також для оцінки поведінки [27]. Відстеження поведінки *D. magna* із застосуванням токсиметра DaphTox II здійснюється за допомогою аналізу зображень. Камера фіксує зміни розташування особин у тестових камерах, на основі яких програмне забезпечення створює окремі плавальні доріжки. Вони служать основою для розрахунку різних поведінкових параметрів, а саме: кількості активних організмів; середньої дистанція плавання; опису вертикального руху; середньої швидкості плавання; індексу класу швидкості; фрактальних розмірів, що призводять до токсичного індексу, що визначає сигнал тривоги [27]. Зміни параметрів реєструються та оцінюються за допомогою токсичного індексу різними способами: «Детектор Хінклі» [28] використовується для розпізнавання раптових змін у межах одного із вимірюваних параметрів, які були зазначені вище. Параметр «Граничні сигнали тривоги» перевіряє, чи досягнуто (верхніх або нижніх) меж параметрів.

Результати власних досліджень показали, що існує широкий вибір доступних біотестів, але для рутинного скринінгу зворотних (стічних) та поверхневих вод корисною буде батарея швидких невеликих біотестів на різних трофічних рівнях. Найбільш класичними екотоксикологічними методами тестування стічних та поверхневих вод є стандартні тести на ракоподібних, зелених водоростях та ін., за

допомогою яких виявляють гостру та хронічну токсичність. Результати дослідження показали, що найбільш ефективною та «чутливою» є методика біотестування з використанням ракоподібних *Ceriodaphnia affinis* [13].

Досі було проведено низку експериментів щодо придатності БСПО для моніторингу стічних вод з метою виявлення потенційного забруднення [29, 30]. Німецькі фахівці оцінили сім різних безперервних та напівбезперервних БСПО для їх застосування у стічних водах [31]. Напівбезперервні методи вимірювання, в яких організми піддаються впливу тестованої води з інтервалами в кілька хвилин, показали хороші результати. До цієї групи входили тест на водоростях, токсикометр на дафніях та тест на люмінесцентних бактеріях. Автори запропонували токсикометр на дафніях як найкраще оцінений метод безперервного вимірювання. Динамічний тест на дафніях та два тести на мідіях відповідали спеціальним вимогам лише дуже обмежено.

Роль безперервного моніторингу може бути не вирішальною для оцінки забруднення поверхневих водних об'єктів від побутових джерел забруднення, оскільки вони мають відносно постійне навантаження, а промислові стічні води можуть демонструвати пікові концентрації сполук (до 1000 разів вище за фоновий рівень), які потрібно тестувати в реальному часі, оскільки динаміка виробництва різних промислових компаній значно відрізняється [32]. БСПО може запропонувати новий інтегрований підхід до безперервного моніторингу якості стічних вод, який ініціює подальший хімічний аналіз, обмежуючи виконання коштовного інструментального аналізу випадками тривоги.

Нещодавно повідомлялося про використання близько 36 000 хімічних речовин у різних галузях промисловості розвинутих країн, сотні з яких вважаються сполуками, що викликають забруднення води [33, 34]. У моніторингу якості води інструменти хімічного аналізу не можуть визначити концентрації всіх сполук, що існують у водній системі, через часові, економічні та технічні обмеження. Крім того, неможливо передбачити комбінований токсичний вплив відомих та невідомих сполук, які постійно впливають на водні організми. Ці обмеження в моніторингу якості води призвели до розробки систем біологічного моніторингу для оцінки загального впливу токсичних хімі-

чних речовин, включаючи синергетичний та антагоністичний вплив сумішей. Звичайні системи біомоніторингу дають менш відтворені дані та не є повністю автоматизованими для спрацьовування тривоги. Нещодавно для моніторингу якості води були розроблені системи цифрової обробки зображень, що складаються з відеокамер, пристроїв захоплення кадрів, комп'ютерів та спеціального програмного забезпечення [35-38]. Цифрова обробка відеозаписів, шляхом аналізу змін у моделях плавання, надає різноманітні дані про поведінку тестових видів. Моніторинг локомоторної поведінки відіграє важливу роль в оцінці навантаження токсичних сполук на екосистему, причому рухливість є важливим компонентом функціонування організмів, що може надати важливу інформацію щодо їхньої фізіології та поведінки [35]. Таким чином, зміни в русі організмів можуть бути використані як відповідний індикатор в оцінці екотоксикологічного ризику. *Daphnia magna* чутливо реагують на стресові ситуації, які можуть бути викликані змінами природних умов навколишнього середовища, таких як температура, рН, доступність кисню та хімічне забруднення, що спричиняє або збільшення, або зменшення плавальної активності. Загалом, дафнії спочатку реагують підвищеною плавальною активністю (тобто гіперактивністю) на вплив токсичних речовин, яка потім сповільнюється (тобто уповільнюється активність). Відповідно, наявність токсичних сполук можна перевірити, вимірявши зміни плавальної активності дафній. Однак виникає проблема визначення «критичного порогу зміненої активності». Вкрай важливо визначити чутливість для виявлення незвичайного стану води, оскільки прагнення до чутливості може призвести до втрати надійності спрацьовування тривоги. У попередніх дослідженнях, пов'язаних з БСПО, більшість дослідників використовували середню швидкість плавання тестових організмів як показник зміни активності. Однак, цей підхід може бути неадекватним, оскільки на швидкість плавання може впливати розмір тіла організму [39]. Для постійно плаваючих зоопланктонів, таких як дафнії, плавальна активність має велике значення як для енергетичного метаболізму, так і для успіху втечі від хижака. Локомоція залежить від м'язової активності і тому є енергетично витратною. З іншого боку, вона дозволяє організмам знаходити та переміща-

тися до регіонів з високою концентрацією їжі [40] та уникати хижаків. Таким чином, аналіз плавальної активності може надати інформацію не лише про фізіологічні порушення (наприклад, неврологічні пошкодження), але й про зміни в моделях розподілу енергії.

Класично швидкість плавання вивчається шляхом порівняння швидкостей плавання стресованих тварин з контрольною групою. Швидкість плавання дафній збільшується з розміром тіла. Таким чином, будь-який фактор, що впливає на розмір тіла, також впливає на швидкість плавання. Стрес зазвичай впливає на темпи росту, а отже, і на розмір тіла. Тому відмінності в швидкості плавання між різними варіантами експерименту, принаймні частково, відобразатимуть відмінності в розмірі тіла, а не реальні відмінності в швидкості плавання.

У порівнянних контрольних умовах розмір тіла є основним фактором, що визначає швидкість плавання *Daphnia magna*. Усі тварини однакового розміру плавають з однаковою швидкістю, незалежно від віку, в якому вони досягають цього розміру. Крім того, зв'язок між розміром тіла та швидкістю плавання не залежить від кількості їжі. Тварини, вирощені в умовах низького рівня їжі або зазнали раптового зменшення кількості їжі, реагують лише зниженням росту (і розмноження), а не зниженням швидкості плавання, пов'язаної з певним розміром. Дафнії, що відчують харчовий стрес, залишаються меншими, і, отже, плавають повільніше, ніж їхні постійно або добре годувані родичі, але їхня швидкість плавання не відрізняється від швидкості плавання добре годуваних тварин аналогічного розміру [39].

Таким чином, різниця в швидкостях плавання між варіантами вимірювання частково відобразатиме різницю в розмірі тіла, а не в активності особини [39]. Це обмеження вимагає розробки іншого підходу, який вказує, де знаходиться певне значення відносно решти значень у наборі даних або популяції, є параметром, який здатний належним чином описати збільшення або зменшення активності плавання.

Незважаючи на численні досягнення в БСПО, деякі проблеми все ще існують, які можна було б покращити з точки зору простої та надійної практичної експлуатації. Основною проблемою БСПО є епізодичні хибні тривоги.

Джерела хибних тривог можна розділити на три групи: тривоги, що виникають через несправність приладу, погані або непередбачувані фізіологічні умови тварин, що використовуються в тесті, та невідповідне налаштування алгоритму тривоги. Тим часом користувачі БСПО постійно просять виробників зробити обладнання простішим та дешевшим для ефективного та економічного управління якістю води. Серед комерційних систем біомоніторингу, що використовують дафнії як тестові організми, два прилади широко використовуються у всьому світі: динамічний тест на дафнії, виготовлений Elektron Ltd. (Німеччина), який відсутній на ринку, але все ще використовується при моніторингу якості води, та токсикометр для дафній, виготовлений bbe Moldaenke (Німеччина). Обидва ці прилади мають лише 2 одночасно спостережувані канали. Камери, що містять середовища та *D. magna* (5–20 тестових організмів), контролюються [41]. На жаль, окремі дафнії неможливо розпізнати; тому прилад видає лише середні значення всіх тестованих організмів. Якщо кількісно визначена активність високоактивованого організму, викликана впливом токсикантів, компенсується активністю повільно рухомих організмів, важко виявити будь-яку різницю в середньому значенні активності між нормальним та аномальним станом тестованого організму. Це може призвести до затримки спрацьовування тривоги. Моніторинг поведінки окремого суб'єкта може дати більш чутливу реакцію на забруднювачі, а також більш детальну інформацію про поведінку організму. З цієї причини була розроблена багатоканальна система біологічного моніторингу, що використовує нову систему Grid Counter, призначену для кількісної оцінки активності рухомих організмів.

Різні методи мають різні переваги та недоліки. Наприклад, під час використання аналітичних методів інформація про параметри поведінки може бути стиснута (наприклад, фрактальна розмірність); проте локальну та глобальну інформацію неможливо одночасно отримати з набору даних про поведінку. Тому важливо використовувати відповідні аналітичні методи, що надають значущу інформацію під час інтерпретації даних про поведінку.

Оцінка даних про поведінку організмів, що постійно контролюються, є дуже складною (тобто особини демонструють нелінійність та

змінну поведінку). Тому такі дані вимагають використання відповідних аналітичних методів, включаючи статистичні та обчислювальні підходи, для полегшення інтерпретації, а отже, використання для ефективного управління. Для аналізу таких даних про поведінку застосовувалися різні статистичні методи, головним чином дисперсійний аналіз, t-тест,

аналіз головних компонентів та кластерний аналіз. Однак нещодавно з'явилися різні інформаційні технології та обчислювальні методи як революційні інструменти для інтерпретації поведінки організмів. Ці технології забезпечують об'єктивний спосіб пояснення та кількісної оцінки закономірностей різних параметрів поведінки.

Висновки

З розвитком комп'ютерного обладнання та програмного забезпечення, а також інформаційно-комунікаційних технологій, поступово розробляються системи моніторингу в режимі реального часу для виявлення змін фізико-хімічних факторів у цільових екосистемах. Датчики є центральним елементом будь-якої такої системи моніторингу. Наразі більшість країн світу використовують системи моніторингу в режимі реального часу, чутливі до фізико-хімічних факторів, для виявлення порушень у водних екосистемах, включаючи поверхневі води, ґрунтові води, стічні води та питну воду. Однак системи фізико-хімічного моніторингу не можуть виявити всі концентрації різних хімічних сполук, які мають різний вплив на водні організми та екосистеми. Хоча для виявлення хімічних концентрацій використовуються такі методи, як газова хроматографія та високоефективна рідинна хроматографія, що забезпечують точні вимірювання, пов'язана з цим вартість аналізу є занадто високою, і, крім того, для роботи з таким обладнанням потрібні професійні техніки. Також, фізико-хімічні датчики вимагають високих витрат на обслуговування та відображають лише локальні та короткострокові коливання у водних екосистемах. Більше того, ці датчики не можуть бути використані для

вимірювання синергетичних та антагоністичних токсичних ефектів, пов'язаних із хімічними сумішами, і не надають інформації про екологічні умови, в яких живуть організми. Виходячи з вищенаведеного, були розроблені системи біологічного раннього попередження (БСПО), які базуються на різних реакціях організмів на порушення. Система БСПО використовується для безперервного контролю якості води, що дозволяє безпосередньо та безперервно виявляти широкий спектр забруднюючих речовин або токсичних умов на основі фізіології та поведінки організмів. Організми відчувають широкий спектр забруднюючих речовин, причому різні таксони організмів реагують по-різному на різні забруднювачі. Таким чином, необхідно розуміти потенційні застосування таких систем, а також те, як БСПО наразі використовується стосовно різних груп організмів.

Власний досвід з розробки експресних систем моніторингу якості вод дозволяє стверджувати, що можливо розробити БСПО, не лише точну та ефективну, але й простішу та дешевшу шляхом зменшення надмірних обчислень та мінімізації вимог до апаратного забезпечення, а також довести переваги розробленої системи за допомогою впровадження сучасного програмного забезпечення.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації цього рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Внесок авторів: автори зробили рівний внесок у цю роботу
В роботі не використано ресурс штучного інтелекту.

Список використаної літератури

1. Крайнюков О., Кривицька І., Найдюнова О. Алгоритм оцінюванню базового набору таксонів задля визначення їх ефективності. *Український журнал природничих наук*, 2024. Т. 8. С. 252-269. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.26>
2. Sandbacka M. та ін. The acute toxicity of surfactants on fish cells, *Daphnia magna* and fish—A comparative study, *Toxicology in Vitro*, 2000. Vol. 14, № 1. P. 61-68. [https://doi.org/10.1016/S0887-2333\(99\)00083-1](https://doi.org/10.1016/S0887-2333(99)00083-1)

3. Roex W.M. та ін. Reproductive Impairment in the Zebrafish, *Danio rerio*, upon Chronic Exposure to 1,2,3-Trichlorobenzene. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2001. Vol. 48, № 2. P. 196-201. <https://doi.org/10.1006/eesa.2000.2029>
4. Slabbert J.L., Venter E.A. Biological assays for aquatic toxicity testing, *Water Science and Technology*, 1999. Vol. 39, № 10–11. P. 367-373. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00300-5](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00300-5)
5. Baumgarten S. та ін. Evaluation of advanced treatment technologies for the elimination of pharmaceutical compounds. *Water Sci. Technol.*, 2007. Vol. 56 № 5. P. 1-8. <https://doi.org/10.2166/wst.2007.550>
6. Schwarzenbach R.P. та ін. The challenge of micropollutants in aquatic systems. *Science*, 2006. Vol. 313 (5790), P. 1072-1077. <https://doi.org/10.1126/science.1127291>
7. Loos R. та ін. EU-wide survey of polar organic persistent pollutants in European river waters. *Environ. Pollut.*, 2009. Vol. 157. №2. P. 561-568. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.09.020>
8. Schäfer R.B. та ін. Occurrence and toxicity of 331 organic pollutants in large rivers of north Germany over a decade (1994 to 2004). *Environ. Sci. Technol.*, 2011. Vol. 45. №14. P. 6167-6174. <https://doi.org/10.1021/es2013006>
9. Kienle C. та ін. Effects of treated wastewater on the ecotoxicity of small streams - unravelling the contribution of chemicals causing effects. *PLoS One*, 2019. Vol. 14. №12. P. 1-30. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226278>
10. Kienle C. та ін. Evaluation of a full-scale wastewater treatment plant with ozonation and different post-treatments using a broad range of in vitro and in vivo bioassays. *Water Research*, 2022. Vol. 212. P. 118084. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118084>
11. Mikol Y.B. та ін. An Online real-time biomonitor for contaminant surveillance in water supplies. *J. Am. Water Works Assoc.*, 2007. Vol. 99 (2) P. 107-115. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2007.tb07873.x>
12. Bownik A., Wlodkowic D. Advances in real-time monitoring of water quality using automated analysis of animal behavior. *Sci. Total Environ.*, 2021. Vol. 789 P. 147796, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147796>
13. 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. № 21. С. 72-80. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2019-21-06>
14. 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. №22. С. 82-92. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2020-22-08>
15. Крайнюков О. М., Кривицька І. А. Дослідження залежності частоти серцевих скорочень *Daphnia Magna* від концентрації токсиканта. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*, 2020. № 14 (92), С. 7-10.
16. Gerhardt A. та ін. Biomonitoring with *Gammarus pulex* at the meuse (NL), aller (GER) and rhine (F) rivers with the online multispecies freshwater biomonitor. *J. Environ. Monit.*, 2007. Vol. 9. P. 979-985. <https://doi.org/10.1039/b706619h>
17. Baldwin Ian G., Harman Mark M.I., Neville David A. Performance characteristics of a fish monitor for detection of toxic substances-I. Laboratory trials. *Water Research*, 1994. Vol. 28. № 10. P. 2191-2199. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)90031-0](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)90031-0)
18. Scott G. R., Sloman K. A. The effects of environmental pollutants on complex fish behaviour: integrating behavioural and physiological indicators of toxicity. *Aquatic Toxicology*, 2004. Vol. 68. № 4. P. 369-39. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2004.03.016>
19. 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 P. 150-156. <https://doi.org/10.1021/es970442j>
20. Maradona A. та ін. 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. P. 95-102. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.03.064>
21. 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. P. 87–110. <https://doi.org/10.1080/10807030802615543>
22. Gerhardt A. Aquatic Behavioral Ecotoxicology-Prospects and Limitations. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2007. Vol. 13. № 3, P. 481–491. <https://doi.org/10.1080/10807030701340839>
23. Gerhardt A. та ін. In situ on-line toxicity biomonitoring in water: Recent developments. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2006. Vol. 25. № 9. P. 2263–2271. <https://doi.org/10.1897/05-486R1.1>
24. Shukla S.J., Huang R., Austin C.P. The future of toxicity testing: a focus on in vitro methods using a quantitative high-throughput screening platform. *Drug Discov. Today*, 2010. Vol. 15 (23–24). P. 997-1007. <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2010.07.007>
25. Noack U., J. Walter The algae toximeter for continuous water monitoring. *Schriftenreihe des Vereins für Wasser-, Boden-und Lufthygiene*, 1992. Vol. 89 P. 305-309.

26. Voetz M. Application of an online toxicity early warning system upstream of the influent of the activated sludge stage of the Hamburg sewage treatment plant network. *Anwendungsmöglichkeit eines Online-Toxizitäts-Frühwarnsystems vor dem Zulauf der Belebungsstufe des Hamburger Klärwerksverbundes*. 2015. Vol. 5. P. 8-57. <http://edoc.sub.uni-hamburg.de/haw/volltexte/2015/3032/>
27. Ebert D. Ecology, epidemiology and evolution of parasitism in Evolution. 2005. Vol. 3. <https://doi.org/10.1108/02634501111102760>
28. Moldaenke C. Report of the project Weiterentwicklung eines mathematische n Modells zur on-line-Erkennung von signifikanten Messwert aenderungen i n dynamischen Biotestverfahren. *DCWK*, 1998. Vol. 1, 2. P. 95-98.
29. Villa S та ін. Effects of a treated sewage effluent on behavioral traits in diamesa cinerella and daphnia magna. *J. Limnol.*, 2018. Vol. 77. № 1. P. 121-130, <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2018.1760>
30. Gerhardt A. Online Biomonitoring for integrated smart real-time water management. *Water Solut*, 2020. Vol. 3 P. 20-23. https://www.limco-int.com/wp-content/uploads/2020/12/05_WasteWater_Report_LimCo.pdf
31. Strategiepapier Kontinuierliche Biotestverfahren für die Emissionsüberwachung. Working Group of the Federal States on Water Problems (LAWA): Stuttgart, Germany. 2000. <https://www.hamburg.de/contentblob/113214/76a5a97b1732495bc7478916a338bb5a/data/emissionsueberwachung.pdf>
32. Anliker S. Assessing emissions from pharmaceutical manufacturing based on temporal high-resolution Mass spectrometry data. *Environ. Sci. Technol.*, 2020. Vol. 54 № 7. P. 4110-4120, <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b07085>
33. Balaram V. та ін. Pollution of water resources and application of ICP-MS techniques for monitoring and management—A comprehensive review. *Geosystems and Geoenvironment*, 2023. Vol. 2. № 4. P. 100210. <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2023.100210>
34. Lapworth D.J., Baran N., Stuart M.E. Emerging organic contaminants in groundwater: a review of sources, fate and occurrence. *Environ. Pollut.*, 2012. Vol. 163. P. 287-303. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.12.034>
35. Baillieul M., Scheunders P. On-line determination of the velocity of simultaneously moving organisms by image analysis for the detection of sublethal toxicity. *Water Research*, 1998. Vol. 32. № 4. P. 1027-1034. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00321-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00321-7)
36. Benecke G, Falke W, Schmidt C. Use of algal fluorescence for an automated biological monitoring system. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 1982. Vol. 28. № 4. P. 385-395. <https://doi.org/10.1007/bf01607700>
37. Michels E. та ін. Phototactic behavior of Daphnia as a tool in the continuous monitoring of water quality: Experiments with a positively phototactic Daphnia magna clone. *Water Res.*, 1999. Vol. 2. P. 401-408. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00213-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00213-9)
38. Ren Z. та ін. The early warning of aquatic organophosphorus pesticide contamination by on-line monitoring behavioral changes of Daphnia magna. *Environ. Monit. Assess.*, 2007. Vol. 134. P. 373-383. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9629-y>
39. Baillieul M., Blust R. Analysis of the swimming velocity of cadmium-stressed Daphnia magna. *Aquatic Toxicology*, 1999. Vol. 44, № 4. P. 245-254. [https://doi.org/10.1016/S0166-445X\(98\)00080-0](https://doi.org/10.1016/S0166-445X(98)00080-0)
40. Bae Mi-J., Park Y.-S. Biological early warning system based on the responses of aquatic organisms to disturbances: A review. *Science of The Total Environment*, 2014. Vol. 466-467. P. 635-649. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.075>
41. Dodson S. I., Hanazato T., Gorski P. R. Behavioral responses of Daphnia pulex exposed to carbaryl and Chaoborus kairomone. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1995. Vol. 14. № 1. P. 43-50. <https://doi.org/10.1002/etc.5620140106>

Стаття надійшла до редакції 18.10.2025
Стаття рекомендована до друку 02.12.2025

Переглянуто 28.11.2025
Опубліковано 30.12.2025

O. M. KRAINIUKOV¹, DSc (Geography), Prof.,
Professor at the Department of Ecology and Environmental Management
e-mail: kraynukov@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5264-3118>

M. M. SHCHOKINA¹,
PhD Student
e-mail: m.shchokina@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-2313-4036>

¹ V. N. Karazin Kharkiv National University
4, Svobody Sq., Kharkiv, Ukraine, 61022

APPLICATION OF BIOLOGICAL EARLY WARNING SYSTEMS: IMPLEMENTING A PROSPECTIVE APPROACH TO WATER QUALITY MONITORING

Purpose. To review international experience in the development and improvement of biological early warning systems.

Methodology. To assess the potential for improving existing biological early warning systems for continuous monitoring of water quality in different water categories.

Results. Behavioral responses have been used for decades as tools for testing aquatic toxicity, but have received much less attention than studies assessing lethality, development, or reproduction. With the improvement of visual and non-visual assessment tools and the increasing knowledge of the importance of behavior for health and fitness, interest in behavioral analysis has increased in recent years. However, to our knowledge, no quantitative evaluation of available methods for testing toxicity in organisms has ever been conducted, and it is unclear whether behavioral studies are a valuable addition to aquatic monitoring. This literature review suggests that behavioral assays are relatively rapid and sensitive and therefore deserve further attention as tools for assessing the toxicological effects of aquatic pollutants. We believe that research aimed at developing and optimizing behavioral assays could prove extremely useful to the field of toxicology, but future work should be directed at determining which specific behavioral patterns are most sensitive to different classes of pollutants, and at understanding the significance of changes in discrete behaviors for health and fitness impacts.

Conclusions. Biological Early Warning Systems (BEWS) rely largely on behavioral responses, with some also assessing other parameters, such as effects on algal chlorophyll fluorescence, at peak pollution levels, from which threshold values are derived. Behavioral changes are superior to mortality rates and other sublethal responses because they bridge the gap between individual and population relevance and are indicators of significant impacts of chemical contamination on a population before more serious consequences (i.e., population declines) occur.

KEY WORDS: *water pollution, toxic properties of water, test object, biological monitoring, biotesting, biological early warning systems*

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest regarding the publication of this manuscript. Further-more, the authors have fully adhered to ethical norms, including avoiding plagiarism, data falsification, and duplicate publication.

Authors Contribution: authors have contributed equally to this work.
The work does not use artificial intelligence resources

References

1. Krainyukov, O., Kryvytska, I., Naydyonova, O. (2024). Algorithm for evaluating the basic set of taxa to determine their effectiveness. *Ukrainian Journal of Natural Sciences*, 8, 252-269. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.26>
2. Sandbacka, M., Christianson, I., Isoma, B. (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)
3. Roex, W.M., Giovannangelo, M., van Gestel, C.A.M. (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>
4. Slabbert, J.L., Venter, E.A. (1999). Biological assays for aquatic toxicity testing, *Water Science and Technology*, 39(10-11), 367-373. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00300-5](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00300-5)
5. Baumgarten, S., Escher, B. I., Fenner, K., Hofstetter, T. B., Wehrli, B. (2007). Evaluation of advanced treatment technologies for the elimination of pharmaceutical compounds. *Water Sci. Technol.*, 56(5), 1-8. <https://doi.org/10.2166/wst.2007.550>

6. Schwarzenbach, R.P. Escher, B. I., Fenner, K., Hofstetter, T. B., Wehrli, B. (2006). The challenge of micropollutants in aquatic systems. *Science*, 313(5790), 1072-1077. <https://doi.org/10.1126/science.1127291>
7. Loos, R. Gawlik, B. M., Locoro, G., Rimaviciute, E., Contini, S., Bidoglio, G. (2009). EU-wide survey of polar organic persistent pollutants in European river waters. *Environ. Pollut.*, 157(2), 561-568. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.09.020>
8. Schäfer, R.B., von der Ohe, P. C., Kühne, R., Schüürmann, G., Liess, M. (2011). Occurrence and toxicity of 331 organic pollutants in large rivers of north Germany over a decade (1994 to 2004). *Environ. Sci. Technol.*, 45 (14), 6167-6174. <https://doi.org/10.1021/es2013006>
9. Kienle, C., Vermeirssen, E. L. M., Schifferli, A., Singer, H., Stamm, C., Werner, I. (2019). Effects of treated wastewater on the ecotoxicity of small streams - unravelling the contribution of chemicals causing effects. *PLoS One*, 14(12), 1-30. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226278>
10. Kienle, C. Werner, I., Fischer, S., Lüthi, C., Schifferli, A., Besselink, H., Langer, M., McArdell, C. S., Vermeirssen, E. L.M. (2022). Evaluation of a full-scale wastewater treatment plant with ozonation and different post-treatments using a broad range of in vitro and in vivo bioassays. *Water Research*, 212, 118084. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118084>
11. Mikol, Y.B., Richardson, W. R., Van Der Schalie, W. H., Shedd, T. R., Widder, M. W. (2007). An Online real-time biomonitor for contaminant surveillance in water supplies. *J. Am. Water Works Assoc.*, 99(2), 107-115. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2007.tb07873.x>
12. Bownik A., Wlodkowic D. (2021). Advances in real-time monitoring of water quality using automated analysis of animal behavior. *Sci. Total Environ.*, 789, 147796, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147796>
13. Krainyukova, A. M., Krainyukov, O. M., Kryvytska, I. A. (2019). Study of the dependence of the toxic effect on the time of contact of toxicants with algae culture. *Visnyk of the V. N. Karazin Kharkiv National University. Series "Ecology"*, (21), 72-80. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2019-21-06>
14. Krainyukova, A. M., Krainyukov, O. M., Kryvytska, I. A. (2020). Using photosynthetic activity of algae for toxicity assessment with the aim of creating a portable device. *Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series "Ecology"*, (22), 82-92. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2020-22-08>
15. Krainyukov, O. M., Kryvytska, I. A. (2020). Study of the dependence of the heart rate of *Daphnia Magna* on the concentration of the toxicant. *International scientific journal "Internauka"*, 14(92), 7-10.
16. Gerhardt, A., Kienle, C., Allan, I. J., Greenwood, R., Guigues, N., Fouillac, A.-M., Millsd, G. A., Gonzaleze, C. (2007). Biomonitoring with *Gammarus pulex* at the meuse (NL), aller (GER) and rhine (F) rivers with the online multispecies freshwater biomonitor. *J. Environ. Monit.*, 9, 979-985. <https://doi.org/10.1039/b706619h>
17. Baldwin, I. G., Harman, M. M.I., Neville, D. A. (1994). Performance characteristics of a fish monitor for detection of toxic substances-I. Laboratory trials. *Water Research*, 28(10), 2191-2199. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)90031-0](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)90031-0)
18. Scott, G. R., Sloman, K. A. (2004). The effects of environmental pollutants on complex fish behaviour: integrating behavioural and physiological indicators of toxicity. *Aquatic Toxicology*, 68(4), 369-39. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2004.03.016>
19. Gerhardt, A., Carlsson, A., Ressemann, C. (1998). A new online biomonitoring system for *Gammarus pulex* (L.) (Crustacea): in situ test below a copper effluent in South Sweden. *Environ. Sci. Technol.*, (32), 150-156. <https://doi.org/10.1021/es970442j>
20. Maradona, A. Marshall, G., Mehrvar, M., Pushchak, R., Laursen, A. E., McCarth, L. H., Bostan, V., Kimberley, A. (2012). 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*, 219-220, 95-102. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.03.064>
21. Amiard-Triquet C. (2009). 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*, 15(1), 87-110. <https://doi.org/10.1080/10807030802615543>
22. Gerhardt A. (2007). Aquatic Behavioral Ecotoxicology-Prospects and Limitations. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 13(3), 481-491. <https://doi.org/10.1080/10807030701340839>
23. Gerhardt, A., Ingram, M. K., Shimon, K. I. J. (2006). In situ on-line toxicity biomonitoring in water: Recent developments. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 25(9), 2263-2271, <https://doi.org/10.1897/05-486R1.1>
24. Shukla, S.J., Huang, R., Austin, C.P. (2010). The future of toxicity testing: a focus on in vitro methods using a quantitative high-throughput screening platform. *Drug Discov. Today*, 15(23-24), 997-1007. <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2010.07.007>
25. Noack, U., Walter, J. (1992). The algae toximeter for continuous water monitoring. *Schriftenreihe des Vereins für Wasser-, Boden- und Lufthygiene*, 89, P. 305-309.
26. Voetz, M. (2015). Application of an online toxicity early warning system upstream of the influent of the activated sludge stage of the Hamburg sewage treatment plant network. *Anwendungsmöglichkeit eines Online-Toxizitäts-Frühwarnsystems vor dem Zulauf der Belebungsstufe des Hamburger Klärwerksverbundes*. 5, 8-57. <http://edoc.sub.uni-hamburg.de/haw/volltexte/2015/3032/>
27. Ebert, D. (2005). Ecology, epidemiology and evolution of parasitism in Evolution. 3, <https://doi.org/10.1108/02634501111102760>

28. Moldaenke, C. (1998). Report of the project Weiterentwicklung eines mathematische n Modells zur on-line-Erkennung von signifikanten Messwert aenderungen i n dynamischen Biotestverfahren. *DCWK*, 1, 2, 95-99.
29. Villa, S., Nica, V. D., Bellamoli, F., Pescatore, T., Ferrario, C., Finizio, A., Lencioni, V. (2018). Effects of a treated sewage effluent on behavioral traits in *Diamesa cinerella* and *Daphnia magna*. *J. Limnol.*, 77(1), 121-130. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2018.1760>
30. Gerhardt, A.(2020). Online Biomonitoring for integrated smart real-time water management. *Water Solut*, 3, 20-23. https://www.limco-int.com/wp-content/uploads/2020/12/05_WasteWater_Report_LimCo.pdf
31. Strategiepapier Kontinuierliche Biotestverfahren für die Emissionsüberwachung. Working Group of the Federal States on Water Problems (LAWA): Stuttgart, Germany. 2000. <https://www.hamburg.de/contentblob/113214/76a5a97b1732495bc7478916a338bb5a/data/emissionsueberwachung.pdf>
32. Anliker, S. (2020). Assessing emissions from pharmaceutical manufacturing based on temporal high-resolution Mass spectrometry data. *Environ. Sci. Technol.*, 54(7), 4110-4120, <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b07085>
33. Balaram, V., Copia, L., Kumar, U. S., Miller, J., Chidambaram, S. (2023). Pollution of water resources and application of ICP-MS techniques for monitoring and management—A comprehensive review. *Geosystems and Geoenvironment*, 2(4), 100210. <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2023.100210>
34. Lapworth, D.J., Baran, N., Stuart, M.E. (2012). Emerging organic contaminants in groundwater: a review of sources, fate and occurrence. *Environ. Pollut.*, 163, 287-303. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.12.034>
35. Baillieul, M., Scheunders, P. (1998). On-line determination of the velocity of simultaneously moving organisms by image analysis for the detection of sublethal toxicity. *Water Research*, 32(4), 1027-1034. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00321-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00321-7)
36. Benecke, G., Falke, W., Schmidt, C. (1982). Use of algal fluorescence for an automated biological monitoring system. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 28(4), 385-395. <https://doi.org/10.1007/bf01607700>
37. Michels E., Leynen, M., C. Cousyn., Meester, L. D., Ollevier, F. (1999). Phototactic behavior of *Daphnia* as a tool in the continuous monitoring of water quality: Experiments with a positively phototactic *Daphnia magna* clone. *Water Res.*, 2, 401–408. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00213-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00213-9)
38. Ren, Z., Zha, J., Ma, M., Wang, Z., Gerhardt, A. (2007). The early warning of aquatic organophosphorus pesticide contamination by on-line monitoring behavioral changes of *Daphnia magna*. *Environ. Monit. Assess.*, 134, 373–383. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9629-y>
39. Baillieul, M., Blust, R. (1999). Analysis of the swimming velocity of cadmium-stressed *Daphnia magna*. *Aquatic Toxicology*, 44(4), 245-254. [https://doi.org/10.1016/S0166-445X\(98\)00080-0](https://doi.org/10.1016/S0166-445X(98)00080-0)
40. Bae, Mi-J., Park, Y.-S. (2014). Biological early warning system based on the responses of aquatic organisms to disturbances: A review. *Science of The Total Environment*, 466–467, 635-649. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.075>
41. Dodson, S. I., Hanazato, T., Gorski, P. R. (1995). Behavioral responses of *Daphnia pulex* exposed to carbaryl and Chaoborus kairomone. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 14(1), 43-50. <https://doi.org/10.1002/etc.5620140106>

The article was received by the editors 18.10.2025
The article is recommended for printing 02.12.2025

The article was revised 28.11.2025
This article published 30.12.2025