

ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ БІОТЕСТІВ ДЛЯ ЕКОТОКСИКОЛОГІЧНОЇ ОЦІНКИ НЕБЕЗПЕЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВІДХОДІВ

Крайнюков О.М., Проненко М.О.

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

У роботі розглянуто проблема з вибором біологічних тестів на екотоксичність з широкого спектру можливих варіантів.

Зростаючий обсяг відходів, що утворюються в усьому світі, створює значні екологічні проблеми, і належне управління ними є важливим для пом'якшення негативного впливу на екологічні системи. Відходи, що визначаються як речовини або предмети, які викидаються або призначені для викидання, можуть мати різні форми, включаючи побутові, промислові, сільськогосподарські та небезпечні відходи. Зі збільшенням виробництва відходів система класифікації та управління ними стала вирішальною для запобігання шкоді для навколишнього середовища.

З метою виявлення матеріалів, які можуть становити ризик для здоров'я людини та екосистем, класифікація відходів зазвичай базується на поєднанні фізичних, хімічних та біологічних властивостей. Серед різних властивостей, що використовуються для оцінки потенційної шкоди відходів, екотоксичність стала ключовим фактором у виявленні відходів, які становлять ризик для навколишнього середовища. Екотоксичність відходів стосується негайних або відкладених ризиків для екосистем, а також потенційних небезпек, що виникають через відходи, які потрапляють до навколишнього середовища. Таким чином, виявлення екотоксичних відходів є важливим кроком в управлінні та утилізації відходів.

Нормативна база в Європейському Союзі та Україні рекомендує визначати екотоксичність відходів, використовуючи такі три категорії: біологічні аналізи, хімічна класифікація та індекс безпеки. Однак методи та критерії тестування екотоксичності відходів відрізняються залежно від країни. Ці підходи не мають стандартизації, що призводить до невідповідностей у класифікації та управлінні відходами. Ці відмінності створюють труднощі для гармонізації управління відходами як у Європейському Союзі і Україні, так і в усьому світі. *Ключові слова:* відходи, забруднення, небезпечні властивості відходів, екотоксичність, біотестування, система біотестів.

Implementation of a biotesting system for ecotoxicological assessment of hazardous properties of wastes. Krainiukov O., Pronenko M.

The paper addresses the problem of selecting biological tests for ecotoxicity from a wide range of possible options.

The increasing volume of waste generated worldwide poses significant environmental challenges, and proper management is essential to mitigate the negative impacts on ecological systems. Waste, defined as substances or objects that are discarded or intended to be discarded, can take many forms, including municipal, industrial, agricultural, and hazardous waste. With the increase in waste generation, a system for classifying and managing them has become crucial to prevent harm to the environment.

In order to identify materials that may pose a risk to human health and ecosystems, waste classification is typically based on a combination of physical, chemical, and biological properties. Among the various properties used to assess the potential harm of waste, ecotoxicity has become a key factor in identifying wastes that pose a risk to the environment. The ecotoxicity of waste refers to the immediate or delayed risks to ecosystems, as well as the potential hazards arising from wastes released into the environment. Therefore, the identification of ecotoxic wastes is an important step in waste management and disposal. The regulatory framework in the European Union and Ukraine recommends determining the ecotoxicity of wastes using the following three categories: biological analyses, chemical classification and hazard index. However, the methods and criteria for testing the ecotoxicity of wastes vary from country to country. These approaches are not standardized, which leads to inconsistencies in waste classification and management. These differences create difficulties for harmonizing waste management both in the European Union and Ukraine, and worldwide. *Key words:* waste, pollution, hazardous properties of waste, ecotoxicity, biotesting, biotest system.

Постановка проблеми. У 2014 році держави-члени Європейського Союзу оновили Європейський перелік відходів (LoW) та визначили 15 небезпечних властивостей НР (НВ – в Україні) відходів, за винятком НР 14 «Екотоксичний» [1, 2]. Ця небезпечна властивість є найчастішою класифікаційною властивістю як небезпечна для відходів [3, 4], якщо використовується метод розрахунку класифікації, маркування та упаковки препаратів і сумішей (CLP Regulation, 2008).

Для перегляду різних підходів до оцінки НР 14 (на основі хімічного аналізу потоків відходів) Генеральний директорат з питань навколишнього середовища Європейської Комісії замовив оцінку чотирьох методів розрахунку НР 14 (Заклик до участі в тендерах: DG ENV, 2014).

Оцінювання цих методів зосереджено на так званих «дзеркальних записках» у списку відходів, тобто на відходах, які можуть бути як небезпечними, так і безпечними; тих, які необхідно оцінювати на пред-

мет їх небезпечних властивостей на основі їхнього хімічного складу або за допомогою біологічних випробувань.

Тим не менш, на рівні ЄС немає конкретних та чітких орієнтирів щодо експериментальних підходів до оцінки екотоксичності відходів. Фактично, Комісія поклала на держави-члени відповідальність за прийняття рішень у кожному конкретному випадку щодо використання біотестів для екотоксикологічної характеристики до отримання подальших вказівок ЄС (Повідомлення Комісії 2018/С 124/01).

Така ж ситуація склалася і в Україні, де у 2023 році прийнято Закон України «Про управління відходами» та Постанову Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку класифікації відходів та Національного переліку відходів», але задля можливості здійснення об'єктивної та достовірної процедури оцінки відповідності визначення Н-фраз (Н4xx – небезпеки для довкілля) встановленим вимогам необхідно також проводити, на думку авторів, більш детальну екотоксикологічну оцінку небезпечних властивостей відходів.

Актуальність дослідження. Для просування циркулярної економіки необхідні ефективні методи оцінки небезпечності відходів. Наразі в Європі та Україні немає валідованого методу випробувань для найпоширенішої небезпечної властивості відходів – екотоксичності.

Небезпечні властивості (НВ) відходів у Європі визначені в Регламенті Комісії (ЄС) № 1357/2014 від 18 грудня 2014 року [2], за винятком НВ 14 «Екотоксичний», який зустрічається найчастіше [5]. Однак, за оцінками, більшість небезпечних (позначених тут як Н) позицій зі списку класифікуються як Н через екотоксичність, на основі гіпотези про загальні концентрації кислотності/лужності, окислювальних/відновних речовин, солоності або біодоступних екотоксичних речовин, які зазвичай зустрічаються в цих відходах. Генеральний директорат з питань навколишнього середовища у травні 2014 року опублікував пропозиції щодо розрахунку НВ 14 на основі хімічного складу відходів за допомогою різних методів. У незалежному дослідженні 120 видів відходів було проведено ранжування чотирьох запропонованих методів розрахунку та випробувано варіант із розширеними коефіцієнтами множення для найбільш екотоксичних речовин [6], який найкраще відповідає Європейському переліку відходів (LoW). Рішення про метод розрахунку без М-факторів було прийнято у 2017 році [7], де також зазначалося, що «результати (екотоксикологічних) випробувань мають переважати», та порушувалося питання щодо біодоступності речовин. Для цих методів розрахунку видоутворення елементів на мінеральні речовини має бути гіпотетичним, метод опанований лише кількома фахівцями, дорогий та підлягає оскарженню. У всіх випадках хімічний склад відходів (з видоутворенням елементів на мінеральні речовини) має бути відомий

для оцінки властивостей токсичності для людини. У хімічному регулюванні прийнято, що результати випробувань мають перевагу над результатами розрахунків [6].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. У рамках оцінки впливу відходів на навколишнє середовище велика перевага тестів на токсичність полягає в застосуванні зваженого інтегрального індексу безпеки, який має бути більш реалістичним та якісним, ніж той, що визначається традиційними табличними підходами, які базуються лише на перевищенні вмісту окремих хімічних речовин та не враховує впливів хімічних речовин на біологічні організми.

Головним завданням українських фахівців, які працюють над проблемою достовірного та об'єктивного встановлення небезпечних властивостей відходів є впровадження напрацьованих європейськими колегами різних методичних підходів та їх ефективне поєднання із вітчизняними доробками [8, 9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Екотоксикологічні випробування можуть забезпечити класифікацію для НВ 14 без гіпотези щодо утворення багатоеlementної речовини, або у випадку невідомих (або нових) забруднювачів чи нанорозмірних форм речовин. Протягом останніх двадцяти років такі експериментальні підходи були розроблені в деяких європейських країнах, що найчастіше об'єднують водні та наземні екотоксичні випробування [9-12]. Існує домовленість щодо приготування елюатів та сумішей відходів з розбавленим субстратом для екотоксичних випробувань [13].

Проведення цих тестів на токсичність відповідає підходу «доза/відповідь», що означає, що різні кількості відходів (елюату або твердої речовини) змішуються з контрольним субстратом (наприклад, середовищем для культивування/розведення з відновленою водою або штучного ґрунту), і для кожної суміші вимірюється біологічний параметр. Доза – це частка відходів (рідких або твердих) у середовищі для культивування. Вимірюється глобальний біологічний ефект, незалежно від виду елементів, біодоступності, речовин та їхнього фізичного стану (розчинна фракція, наночастинки, мікрочастинки, масив тощо). Результати цих тестів можна виразити у вигляді значень EC_x . Значення EC_x – це концентрація рідини або фільтрату з твердих відходів або твердої речовини в суміші з контрольним субстратом, яка призводить до біологічного ефекту (зниження відносно контролю) на $x\%$, а саме на 20% або 50% росту, рухливості, розмноження тощо. EC_{50} 8% означає, що розведення 8% відходів у середовищі для культивування/розведення призводить до зниження рухливості на 50%. Для забезпечення порівняльності результатів випробувань підготовку елюатів (співвідношення рідина/тверда речовина = 10 л/кг сухої речовини, 24 год)

та сумішей відходів з контрольним субстратом слід проводити відповідно до [13, 14].

Насправді, у європейському підході не робиться чіткої різниці між оцінкою безпеки та ризику. Відходи слід класифікувати за безпекою та управляти ними з точки зору ризику в рамках їхнього передбачуваного використання або сценарію управління. Деякі екотоксикологічні тести розроблені як міні-оцінка ризику в неписаному сценарії управління відходами. Екотоксичність не є справді невід'ємною властивістю відходів.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Для деяких небезпечних властивостей, що потребують тестування, ні методи випробувань, ні вимоги/граничні значення ще не були визначені на практиці. Тому розробка системи біотестів для визначення небезпечних властивостей відходів є вкрай необхідною та актуальною проблемою.

Новизна. У процесі проведення аналітичного огляду розглянуто різні методичні підходи з оцінки небезпечних властивостей відходів, які при практичному доопрацюванні можливо впровадити в українську систему поводження з відходами.

Методологічне або загальнонаукове значення. Навести рекомендації щодо впровадження системи біотестів для оцінки небезпечних властивостей відходів.

Викладення основного матеріалу. У Європейському Союзі небезпечні властивості відходів мають визначатися відповідно до Регламенту Комісії (ЄС) № 1357 (ЄС 2014). Однак донедавна не було вказано, як слід оцінювати властивість HP 14 («екотоксичні»: відходи, які становлять або можуть становити негайні чи відкладені ризики для одного або кількох секторів навколишнього середовища), але ця ситуація змінилася (Регламент Ради (ЄС) 2017/997). Фактично, можливі два підходи:

1. Оцінка відповідно до класифікації хімічних сумішей (підхід Класифікація, маркування та упаковка CLP – ЄС 2008);

2. Екотоксикологічні випробування відходів з використанням стандартних методів ISO.

Спочатку екотоксикологічний підхід був розроблений для оцінки забруднення ґрунтів. Він складався з набору водних та наземних тестів, результати яких оцінювалися разом. Нещодавно цей підхід був (з незначними змінами) використаний у Технічному звіті «Керівництво щодо використання екотоксичних тестів, що застосовуються до будівельних виробів» (CEN/TR 17105 (2017)).

Такий набір екотоксикологічних тестів був успішно використаний для різних відходів у Франції [15] та, зокрема, у міжнародному кільцевому тесті. Одним із результатів цього кільцевого тесту було використання трьох методів випробувань для елюатів відходів та трьох тестів для твердих відходів, але все ще існували певні сумніви щодо того, які саме

методи випробувань слід включити до набору тестів. З міркувань прийнятності та якості даних слід використовувати стандартизовані методи випробувань (бажано, ISO, CEN (Європейський комітет з нормалізації)). Також рекомендується, щоб будь-який набір тестів охоплював види з трьох основних груп трофічних організмів (мікроби, рослини та тварини), щоб охопити широкий спектр фізіологічних та екологічних властивостей.

Нарешті, кількість трьох методів випробувань на відсік (водні/елюати та наземні/тверді відходи) здається хорошим компромісом між загальним охопленням та практичністю (тобто зусилля з точки зору часу та витрат є керованими).

Небезпека відходів розраховується на основі їхнього складу, тобто шляхом додавання концентрацій усіх хімічних речовин з хронічною водною токсичністю (Регламент Ради. 2017/997 (ЄС 2017)). Однак відходи містять багато, часто невідомих хімічних речовин, і навіть якщо вони відомі, немає гарантії, що для них доступні екотоксикологічні дані. Крім того, не враховується взаємодія між окремими компонентами відходів. Однак, згідно з нещодавнім Регламентом Ради, у випадку проведення екотоксикологічних випробувань з відповідними відходами, їх результати матимуть переважну силу (ЄС 2017).

Таким чином, рекомендації ЄС щодо оцінки HP 14 все ще базуються на законодавстві CLP для хімічних речовин загалом, але існують деякі труднощі у використанні цієї методології. Дійсно, CLP пов'язаний з чистими хімічними речовинами та їх стабільними сумішами, тоді як відходи можуть містити різноманітні речовини зі змінним складом [5]. Крім того, цей підхід вимагає інформації про речовини, але склад відходів часто оцінюється з урахуванням вмісту окремих елементів [5], а взаємодія цих елементів може бути невідомою. Отже, зазвичай розглядається консервативний «найгірший сценарій», який допускає негативний вплив на навколишнє середовище хімічної форми для кожного елемента [5]. Такий підхід часто призводить до переоцінки екотоксичності. Ще однією проблемою є нереалістичне припущення, що загальний вміст сприяє потенційній екотоксичності, оскільки не весь вміст елементів є біодоступним [16, 17]. Зрештою, може бути важко ідентифікувати конкретні органічні речовини у відходах, і тому екотоксичність може бути недооцінена. Різні автори визнали вилуговування основним шляхом екотоксичності, відповідно до регламенту CLP, і запропонували методи оцінки HP 14, засновані на даних вилуговування та моделюванні геохімічного видоутворення, щоб визначити, які конкретні мінерали/речовини можуть бути присутніми у відходах, та їх вилуговування за вибраного значення рН. Однак, слід також оцінити пряму екотоксичність щодо ґрунтових екосистем. Екотоксичний вплив речовин, нерозчинних у воді, може бути недооцінений, якщо розглядати лише водний відсік, і тому

наземний відсік є актуальним, особливо для оцінки гідрофобних відходів.

Біотестування відображає вплив усіх речовин, їх взаємодії (адитивні, антагоністичні та синергетичні), а також біодоступну фракцію зокрема [11]. Таким чином, оцінка екотоксичності за допомогою біотестів є дуже актуальним підходом до класифікації відходів, оскільки він охоплює всю складну матрицю в цілому. Для більш повної оцінки НР14 бажано рекомендувати використовувати ряд біотестів, включаючи тести як у водних, так і в наземних середовищах з організмами різного трофічного/функціонального рівня, з урахуванням різних типів ефектів (наприклад, фізіологічних та поведінкових) та різних сценаріїв впливу.

Обговорення ефективності біотестових систем є актуальним питанням, яке може сприяти впровадженню цього підходу. Зокрема, тривалість біотестів та обсяг необхідних лабораторних ресурсів є ключовими факторами, які слід враховувати, прагнучи широкого впровадження екотоксикологічної оцінки відходів. Тривалість випробувань є важливою змінною, оскільки різні підприємства мають завжди намір уникати тривалого зберігання відходів. Крім того, обсяг необхідних лабораторних ресурсів визначатиме зручність застосування цих тестів у різних лабораторіях, а отже, і прийняття такого підходу.

Головні висновки. Вдосконалення підходів до екотоксикологічного тестування, які були запропоновані для оцінки НР 14 у різних країнах, є вкрай важливою проблемою. Ефективність біотестів є ключовою ланкою для мотивації впровадження в промисловості та включення їх до законодавчого поводження з відходами. Зміни в законодав-

стві в цьому відношенні, ймовірно, призведуть до значного впливу на управління відходами, спрямованого на належне налаштування відповідних заходів для захисту навколишнього середовища. Удосконалення екотоксикологічної оцінки не тільки сприяє оцінці небезпечних властивостей відходів в різних країнах світу, але й надає корисну інформацію, яка може бути використана для покращення алгоритму проведення екотоксикологічних досліджень відходів.

Перспективи використання результатів дослідження. Оцінка кожної з небезпечних властивостей відходів базується на вмісті потенційно небезпечних речовин або на результаті випробування певної властивості. Визначення небезпечних властивостей відходів тільки за допомогою ідентифікації чистих хімічних речовин та сумішей чистих хімічних речовин, які знаходяться у складі відходів є недосконалим алгоритмом. Відходи зазвичай складаються із суміші численних речовин. У багатьох випадках приблизний склад відходів може бути відомий з точки зору елементарних складових, тоді як фактичні форми (речовини/сполуки), в яких вони присутні, часто є значною мірою невідомими. Існує суттєва потреба в розробці рекомендацій та сучасних підходів у цій галузі. Для деяких небезпечних властивостей, що потребують тестування, ні методи випробувань, ні вимоги/граничні значення ще не були визначені на практиці. Включення біотестування до оцінки екотоксичності відходів є ще одним (новим) викликом, який вимагає розробки практичних та застосовних процедур та впровадження нової методології щодо оцінки небезпечності відходів та їх впливу на навколишнє середовище.

Література

1. EU 2014a. Commission Decision 2014/955/EU of 18 December 2014 amending Decision 2000/532/EC on the list of waste pursuant to Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council. Official Journal of the European Union. 30.12.2014. L 370/44. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014D0955&rid=1>
2. EU 2014b. Commission Regulation (EU) No 1357/2014 of 18 December 2014 replacing Annex III to Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council on waste and repealing certain Directives. Official Journal of the European Union. 19.12.2014. L 365/89. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R1357&rid=1>
3. Про управління відходами: Закон України від 29.06. 2023 р. № 2320-IX / Відомості Верховної Ради України. Київ: Парлаи. вид-во, 2023. 25с. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#n987> (дата звернення: 15.11.2024).
4. Про затвердження Порядку класифікації відходів та Національного переліку відходів : Постанова Кабінету Міністрів України від 20.10.2023р. № 1102. *Офіційний вісник України*. 2023. № 4. С. 530–543.
5. Hennebert P., Hans A. van der Sloot, Rebischung F., Weltens R., Geerts L., Hjelmar O. Hazard property classification of waste according to the recent propositions of the EC using different methods, *Waste Management*, Vol. 34, Is. 10. 2014. pp. 1739-1751. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.05.021>.
6. CLP 2008. Regulation (EC) n 1272/2008 of the European parliament and of the Council of 16 December 2008 on classification, labelling and packaging of substances and mixtures, amending and repealing Directives 67/548/EEC and 1999/45/EC, and amending Regulation (EC) No 1907/2006. 31.12.2008. Official Journal of the European Union L 353/1. Last update <https://echa.europa.eu/fr/regulations/clp/legislation>
7. EU 2017a. Council Regulation (EU) 2017/997 of 8 June 2017 amending Annex III to Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council as regards the hazardous property HP 14 «Ecotoxic». Official Journal of the European Union. 14.6.2017. L 150/1. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017R0997&rid=1>
8. Крайнюков О. М., Кривицька І. А., Житнецький І. В. Токсикологічна оцінка якості очищення бурових стічних вод. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Екологія»*. 2022. Вип. 28. С. 83-90. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2023-28-07>

9. Крайнюков О.М., Кривицька І.А., Найдьонова О.Є., Лукаш М.С., Лукаш К.М. Впровадження методу біотестування задля оцінки небезпечних властивостей відходів. *Екологічні науки. науково-практичний журнал. Видавничий дім «Гельветика»*. № 5(56). 2024, с. 198-202 <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.5-56.30>
10. Hennebert P., Humez, N. Conche I., Bishop I., Rebischung F. Assessment of four calculation methods proposed by the EC for waste hazardous property HP 14 «Ecotoxic», *Waste Management*, Vol. 48. 2016. pp. 24-33. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.044>.
11. Römbke, J. Testing of 24 potentially hazardous wastes using 6 ecotoxicological tests. *Detritus*, 4, 2018. p. 4-21. <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2018.13745>
12. Römbke, J., Jänsch, S., Meier, M., Hilbeck, A., Teichmann, H., & Tappeser, B. General recommendations for soil ecotoxicological tests suitable for the environmental risk assessment of genetically modified plants. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 6(2), 2010. p. 287-300. <https://doi.org/10.1897/IEAM.2009-043.1>
13. EN 14735:2006. Characterization of waste – Preparation of waste samples for ecotoxicity tests. CEN, Belgium.
14. Römbke J., Aira M., Backeljau T., Breugelmans K., Domínguez J., Funke E., Graf N., Hajibabaei M. DNA barcoding of earthworms (*Eisenia fetida/andrei* complex) from 28 ecotoxicological test laboratories, *Applied Soil Ecology*, Vol. 104. 2016. pp. 3-11. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.02.010>.
15. Pandard P., Devillers J., Charissou A.-M., Poulsen V., Jourdain M. Selecting a battery of bioassays for ecotoxicological characterization of wastes, *Science of The Total Environment*, Vol. 363, Iss. 1–3. 2006. pp. 114-125. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.12.016>.
16. Mänskinen K., Nurmesniemi H., Pöykiö R. Total and extractable non-process elements in green liquor dregs from the chemical recovery circuit of a semi-chemical pulp mill, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 166, Is. 3. 2011. pp. 954-961. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.11.082>.
17. Nurmesniemi H., Pöykiö R., Perämäki P., Kuokkanen T. The use of a sequential leaching procedure for heavy metal fractionation in green liquor dregs from a causticizing process at a pulp mill, *Chemosphere*, Vol. 61, Is. 10. 2005. pp. 1475-1484. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.04.114>.

Дата першого надходження рукопису до видання: 29.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації: