

РОСЛИНИ ЯК ЧИННИК НАДІЙНОСТІ НАЗЕМНИХ ЕКОСИСТЕМ ТА ЇХНЄ ЗНАЧЕННЯ ДЛЯ БІОІНДИКАЦІЇ ТА БІОТЕСТУВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ

Хижняк С.В., Корнієнко В.І., Войціцький В.М., Коверсун І.В., Дудченко Н.Я.

Національний університет біоресурсів і природокористування України

вул. Героїв Оборони, 15, 03041, м. Київ

khs2014@ukr.net

Рослинам належить провідна роль у забезпеченні життєдіяльності та функціональної активності наземних екосистем. Виконуючи роль первинних продуцентів, рослини перетворюють сонячну енергію на хімічну, створюючи основу для живлення всіх інших організмів в екосистемі. Акцентується увага на тому, що завдяки здатності рослин протистояти дії негативних чинників довкілля, формується надійність екосистем до впливу цих чинників, зокрема, хімічних токсичних забруднювачів як природного, так і антропогенного походження. На сьогодні, одним із основних джерел забруднення наземних екосистем – є зони військових дій. Внаслідок застосування різного виду зброї, чисельних вибухів артилерійських снарядів та ракет, пожеж тощо у довкілля потрапляють різноманітні токсичні хімічні сполуки. Зазначається, якщо рослини здатні реагувати на дію забруднювачів довкілля зміною морфологічних, фізіологічних, біохімічних та інших характеристик, вони можуть бути біоіндикаторами стану довкілля в моніторингових дослідженнях. Добір рослин-індикаторів визначається їхнім чутливим реагуванням на вплив забруднювачів. Для оцінки забруднення наземних екосистем показана доцільність використання методу біотестування (фітотестування) за показниками проростання та росту вищих рослин. Еколого-токсикологічне дослідження стану наземних екосистем методами біоіндикації та біотестування дозволяє безпосередньо оцінити біологічно значущу дію забруднювачів. Біологічні методи моніторингу стану наземних екосистем є незамінними, оскільки визначення токсичності і шкідливості забруднювачів для живих організмів дозволить зробити більш надійні прогнози екологічних наслідків забруднення екосистеми, в тому числі внаслідок військових дій. *Ключові слова:* рослини, надійність екосистем, військові дії, забруднювачі довкілля, біоіндикація, біотестування.

Plants as a factor in the reliability of terrestrial ecosystems and their importance for bioindication and biotesting of environmental pollution. Khyzhniak S., Kornienko V., Voitsitskyi V., Koversun I., Dudchenko N.

Plants play a leading role in ensuring the vital activity and functional activity of terrestrial ecosystems. Performing the role of primary producers, plants convert solar energy into chemical energy, creating the basis for nutrition of all other organisms in the ecosystem. The emphasis is on the fact that due to the ability of plants to resist the action of negative environmental factors, the reliability of ecosystems to the influence of these factors, in particular, chemical toxic pollutants of both natural and anthropogenic origin, is formed. Today, one of the main sources of pollution of terrestrial ecosystems is military zones. As a result of the use of various types of weapons, numerous explosions of artillery shells and missiles, fires, etc., various toxic chemical compounds enter the environment. It is noted that if plants are able to respond to the effects of environmental pollutants by changing their morphological, physiological, biochemical and other characteristics, they can be bioindicators of the state of the environment in monitoring studies. The selection of indicator plants is determined by their sensitive response to the effects of pollutants. To assess the pollution of terrestrial ecosystems, the feasibility of using the biotesting (phytotesting) method in determining germination and growth indicators of higher plants is shown. Ecological and toxicological studies of the state of terrestrial ecosystems using bioindication and biotesting methods allow us to directly assess the biologically significant effect of pollutants. Biological methods for monitoring the state of terrestrial ecosystems are indispensable, since determining the toxicity and harmfulness of pollutants for living organisms will allow us to make more reliable predictions of the environmental consequences of ecosystem pollution, including as a result of military operations. *Key words:* plants, ecosystem reliability, military operations, environmental pollutants, bioindication, biotesting.

Постановка проблеми. Рослинам належить провідна роль у колообігу речовин і обміні енергії, що забезпечує існування життя на Землі. В органічних речовинах зелених рослин накопичується сонячна енергія в процесі фотосинтезу. Ці рослини підтримують (разом з фотосинтезуючими мікроорганізмами) необхідний для аеробних організмів рівень Оксигену (O_2) в атмосфері і запобігають утворенню надлишку вуглекислого газу (CO_2).

Рослини є харчовим продуктом для людей та кормом для тварин, а також сировиною для виготовлення товарів. Наземні рослини беруть участь у створенні родючого шару ґрунту, ландшафтоутворенні, формуванні умов для існування інших організмів, важлива їхня роль в регуляції водного балансу та очищенні повітря.

Враховуючи, що рослини – невід’ємний компонент екосистем, в яких вони проростають, над-



звичайно важливу роль надають екології рослин. Це науковий напрямок про взаємозв'язок та взаємовплив рослин та їхніх угруповань з довкіллям [1]. В його основі – визначення умов біологічної рівноваги в природі, в тому числі для рослинності, за яких природа могла би розвиватися у відповідності із запитамі людства і можливостями нашої планети Земля на даний історичний період. Екологічні проблеми давно вже є антропоцентричними, оскільки негативні зміни в природі оцінюють щодо умов існування людей, навіть якщо це стосується проблеми збереження біорізноманіття. Антропогенна діяльність загрожує забрудненню довкілля, порушенню рівноваги популяцій в біосфері, знищенню природних середовищ, руйнуванню екосистем.

На даний час при контролі стану довкілля та оцінці його якості використовують не лише фізико-хімічні методи [2], але і прийоми біоіндикації [3] та біотестування [4] для отримання інформації за реакцією організмів на забруднення екосистем. Саме рослини є поширеними біоіндикаторами стану екосистем [5, 6].

Актуальність дослідження. Рослини – невід'ємний компонент екосистем, в яких вони проростають. Зміна стану довкілля, що викликає порушення структури і функціонування екосистем, обумовлений впливом на їхню біоту, зокрема на такий компонент як рослини. Виходячи з цього, важливим є використання рослин для оцінки стану екосистем враховуючи їхню реакцію на дію негативних чинників довкілля. Розуміння ролі рослин дає можливість їхнього широкого використання для визначення біологічно значущих забруднень наземних екосистем за впливу різноманітних забрудників (токсичних речовин).

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Встановлення процесів, які сприяють адаптації життєздатності рослин до впливу зовнішніх чинників є глобальною екологічною проблемою. Особливо актуально це для культурних рослин, що може сприяти їхньої врожайності, та, взагалі, збереженню біорізноманіття. Багатокомпонентність забруднення наземних екосистем ускладнює ефективність його контролю. Метод біотестування надає інформацію щодо впливу забруднення навколишнього середовища на біоту, оскільки воно базується на реакціях живих організмів на чинники, які можуть діяти синергічно або антагоністично [7]. Використання біотестування із застосуванням сільськогосподарських рослин (пшениця *Triticum aestivum*) сприяло оцінці небезпечності сумісного пестицидного та кадмієвого навантажень на ґрунт аграрної екосистеми [8].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Тотальний техногенний розвиток суспільства спричинив глобальний вплив людства на біосферу. Екологічною проблемою стало порушення струк-

тури і функціонування екосистем внаслідок їхнього забруднення токсичними речовинами. Забруднення, внаслідок привнесення в довкілля різноманітних нехарактерних хімічних чинників або перевищення їх природного рівня у довкіллі, виводить екосистеми з рівноваги [9]. Тому, проблема надійності екосистем за дії забрудників довкілля, що є визначальним в існуванні екосистем і ролі рослин в цьому, продовжує широко досліджуватись [10–13]. Також відмічається можливість використання рослин-індикаторів для оцінки впливу токсичних чинників на екосистеми [5, 6].

Доцільність використання біологічних (біоіндикація і біотестування) методів оцінки якості компонентів довкілля в умовах антропогенного навантаження відмічається поряд з аналітичними методами [5]. Біологічні методи контролю за станом наземних екосистем є незамінними, оскільки визначення токсичності і шкідливості забруднювачів для живих організмів дає можливість оцінити біологічну якість середовища [4].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Для вирішення проблеми збереження життєздатності і функціональної активності наземних екосистем за впливу на них негативних чинників довкілля суттєвим є визначення стійкості біоти цих екосистем, зокрема рослинності. У зв'язку з цим, продовження досліджень з використанням рослин в якості біоіндикаторів рівнів забруднення може сприяти розширенню переліку необхідних для цього рослин. Крім того, біотестування за використання рослин дасть можливість оцінити ризики при багатоконпонентному забрудненні екосистеми. Таким чином, використання рослин дає можливість добирати міри збереження екосистем.

Новизна. Із залученням даних наукової літератури проаналізовані відомості стосовно значення рослинності в наземних екосистемах для підтримання їхнього функціонального стану. Особливо це важливо за впливу негативних чинників довкілля (враховуючи наслідки військових дій), що обґрунтовує необхідність використання рослин для біоіндикації та біотестування цих впливів.

Викладання основного матеріалу. Надійність екосистем – це її фундаментальна властивість (визначається біотою), що означає ефективне існування та функціонування (в межах природних флуктуацій) у випадку мінливих умов середовища та в часі [11, 12]. Тобто здатність підтримувати структуру, самовідновлюватися і саморегулюватися, виконувати притаманні екосистемі функції за зміни умов довкілля. Надійність екосистем взаємопов'язана з їхньою стійкістю – здатністю екосистем в цілому та її об'єктів (складових частин) протистояти дії негативних для них чинників, зберігаючи при цьому в динамічній рівновазі свою структуру і функції [11].

Рослини є фундаментом надійності екосистем, виконуючи роль первинних продуцентів. У процесі фотосинтезу рослини кумулюють енергію Сонця у вигляді хімічних зв'язків органічних сполук (вуглеводів) та виділяють у довкілля Оксиген. Рослини, яким властиві живлення, розмноження, ріст і розвиток, належить провідна роль у забезпеченні життєдіяльності та функціональної активності екосистем, зокрема, наземних екосистем. Тобто, рослини є показником складної високонадійної системи (екосистеми), яка може забезпечуватися використанням високонадійних елементів і/або спеціальними системами відновлення та резервування [12].

Дія негативних чинників довкілля викликає у живих організмів стрес – неспецифічну відповідь, яка характеризується комплексом змін, та є першим необхідним етапом пристосування до змінених умов, етапом адаптації [13]. Адаптація, як загальна властивість всіх організмів, притаманна рослинам, а з урахуванням їхнього фундаментального значення для наземних екосистем, це сприяє стійкості екосистем, а значить і їхній надійності [14].

Існує низка як природних, так і антропогенних чинників (зокрема, хімічних речовин), які можуть бути негативними для рослин за перевищення певного порогу дії. Це так звані «екологічні чинники», вплив яких є характерним для кожного організму і залежить, насамперед, від самого чинника, характеру його дії, а також від періоду життя організму [9].

Антропогенні забруднення – це забруднення довкілля, які викликані діяльністю людини. Вони поділяються на промислові (металургійні, хімічні, електротехнічні та інші небезпечні підприємства); сільськогосподарські (використання добрив і отрутохімікатів та інші, які пов'язані з сільським господарством); промислові та побутові відходи; викиди у довкілля продуктів спалювання викопного палива (вугілля, нафти, газу, торфу, сланцю); викиди і скиди транспортного комплексу, а також забруднювачі внаслідок військових дій [15]. Саме військові дії, які поширюються у всьому світі, є причиною використання зброї та вибухових матеріалів, транспортування військових матеріалів, функціонування військових комплексів, що обумовлює негативний вплив на довкілля [16, 17].

Токсичність забруднювачів (негативний вплив на біоту) проявляється коли вони накопичуються у довкіллі в кількості, достатній для ініціації токсичного ефекту. Забруднювачі концентруються у ґрунті, рослинах, а з кормом надходять до організму тварин, тобто потрапляють трофічними ланцюгами до організму людини.

Для характеристики міграційних процесів забруднювачів довкілля прийнято застосовувати коефіцієнти накопичення і переходу [18]. Для рослин коефіцієнт накопичення (K_n) – показник, який свідчить про те, у скільки разів більшою чи меншою може бути кількість забруднювача в компоненті екосис-

теми (рослина) у порівнянні з його вмістом в об'єкті екосистеми (ґрунт).

$$K_n = C_1 / C_2,$$

де C_1 – вміст забруднювача (мг або мкг) в 1 кг повітряно-сухої біомаси рослин; C_2 – вміст цього забруднювача (мг або мкг) в 1 кг повітряно-сухої маси ґрунту, на якому ці рослини проростали.

Коефіцієнт переходу (K_n) – показник, який становить співвідношення між кількістю забруднювача в компоненті екосистеми і його кількістю у довкіллі, зокрема для рослин:

$$K_n = C_1 / C_3,$$

де C_1 – вміст забруднювача (мг або мкг) в 1 кг повітряно-сухої біомаси рослин; C_3 – поверхневий питомий вміст забруднювача на 1 м² поверхні ґрунту на якому ці рослини проростали (мг або мкг на 1 м² ґрунту) чи ваговий – в 1 кг повітряно-сухого ґрунту кореневої зони (мг або мкг на 1 м² ґрунту кореневої зони).

Рослини, в залежності від чутливості до забруднювачів довкілля, поділяють на індикатори і кумулятори. Рослини-кумулятори здатні у своїй фітомасі (переважно у наземних органах) накопичувати з ґрунту забруднювачі до рівней, які значно перевищують їхню концентрацію в ґрунті. На даний час ідентифіковано понад 500 різновидів рослин-кумуляторів. Серед них є рослини-гіперкумулятори, які здатні накопичувати важкі метали майже в 500 разів більше, ніж у ґрунті [9]. Прикладом рослин-кумуляторів є: соняшник однорічний (*Helianthus annuus*) переважно накопичує Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn; ячмінь (*Hordeum vulgare*) – Al; люцерна (*Medicago sativa*) – Cr; пшениця м'яка (*Triticum aestivum*) – Pb; та інші рослини.

Здатність деяких рослин накопичувати забруднювачі довкілля у великій кількості обумовлена, як вважається, наявністю ендегенних систем, яким притаманна антиокиснювальна спроможність [1].

Рослини-індикатори накопичують забруднювачі до рівня, що не перевищує їхню концентрацію в ґрунті. Характерними рисами рослин-індикаторів є: 1) їх постійна присутність у досліджуваній екосистемі, що дає можливість визначати хронічний вплив негативного чинника; 2) спроможність реагувати дії комплексу негативних чинників; 3) здатність визначати джерела і місця скупчення забруднювачів в екосистемах.

Істотною властивістю рослин-індикаторів є їхня чутливість до негативних чинників довкілля, в тому числі забруднювачів. Рослини є невід'ємною компонентою наземних екосистем, середовище існування яких визначають властивості ґрунту, такі як вологоємність, щільність, засоленість, кислотність тощо. Тобто, за певними рослинами можна визначити стан ґрунту, на якому вони ростуть. Крім того, для контролю стану довкілля та оцінки його якості при антропо-

погенних забруднень застосовують біоіндикацію (фітоіндикацію) – визначення біологічно значущих забруднень на основі реакцій на них рослин-індикаторів.

Добір рослин-індикаторів визначається їхнім чутливим реагуванням на вплив негативного чинника. За необхідності такі рослини-індикатори до певних забруднювачів можна створити методами генетичної інженерії. Найбільш поширеними біоіндикаторами забруднення ґрунтів є: мохи (Musci), лишайники (Lichen), ґрунтові водорості. Таким чином, біоіндикація – вагомий інструмент для визначення комбінованого ефекту внаслідок забруднення наземної екосистеми, що можливо на основі спостереження за реакцією сукупності рослин-індикаторів.

При оцінці забруднення наземних екосистем інформаційним є метод біотестування (фітотестування) за показниками проростання та росту вищих рослин [19]. Наявність широкого спектра рослинних біотестів дає змогу використовувати їх для тестування різноманітних чинників чи групи чинників хімічної та фізичної природи. На сьогодні, одним із основних джерел забруднення наземних екосистем вважаються зони військових дій. Показано, що поряд з аналітичними методами, використання біотестування при комплексній оцінці забруднення ґрунтів внаслідок військових дій сприяє більш надійній оцінці екологічних ризиків [20].

Головні висновки. Рослини відіграють провідну роль в колообігу речовин і обміні енергії в наземних екосистемах. Як компоненти екосистем, вони сприяють надійності та стійкості екосистем до дії негатив-

них чинників довкілля, в тому числі антропогенних забруднювачів. Об'єктивна та повна оцінка екологічного стану екосистем можлива при поєднанні фізико-хімічних методів та методів біоіндикації і біотестування. Біологічні методи, при використанні рослин, дозволяють швидко оцінити екологічний стан наземних екосистем. Застосування різномірних біоіндикаторів є перспективним напрямом у системі екомоніторингу.

Методи біоіндикації (фітоіндикації) та біотестування (фітотестування) дозволяють швидко оцінити біологічно значущу дію негативних чинників довкілля, що може бути актуально при дослідженні впливу військових дій на екосистеми. У свою чергу, це може бути запорукою сталості як природних, так і аграрних екосистем, поліпшення їхнього стану за позитивного керованого впливу на стійкість цих екосистем.

Перспективи використання результатів дослідження. Акцентування уваги на значенні рослин в надійність та стійкості екосистем розширює можливість їхнього використання для оцінки стану наземних екосистем за дії негативних чинників довкілля. Особливо це важливо при багатокомпонентному забрудненні довкілля внаслідок військових дій, що дозволить зробити більш надійні прогнози екологічних наслідків та більш ефективні стратегії управління забрудненими ділянками.

Дослідження проводились в рамках науково-дослідної роботи (НДР) № державної реєстрації 0125U001918, що фінансується Міністерством освіти і науки України.

Література

1. Глобальне здоров'я, якість і безпека життя: довідник-монографія у 3-х томах/ В.М. Войціцький та ін. Київ: ЦК «Компринт», 2019. 640 с.
2. Войціцький В.М., Хижняк С.В., Карамушка В.І. Аналітичні методи визначення хімічних токсичних забруднювачів довкілля: підручник. Київ: Вид-во НаУКМА, 2025. 364 с.
3. Комплексна екологічна оцінка стану довкілля за індикаторними показниками деревних рослин рекреаційних зон м. Запоріжжя / К.С. Крупей та ін. *Екологічні науки*. 2022. № 1, Вип. 40. С. 78 – 84. doi:10.32846/2306-9716/2022.eco.1-40.14
4. Крайнюков О.М., Кривицька І.А. Удосконалення способу визначення ступеня забрудненості ґрунтів методом біотестування. *Вісник Запорізького національного університету. Біологічні науки*. 2018. № 1. С. 83 – 89.
5. Моніторинг екосистем: цілі, необхідність, роль біоіндикації / В.М. Войціцький та ін. *Біоресурси і природокористування*. 2019. № 3 – 4. т. 11. С. 39 – 46.
6. Вибір показників для екологічного нормування наземних екосистем / В.М. Войціцький та ін. *Таврійський науковий вісник*. 2024. № 135. С. 218 – 225. doi:10.32782/2226-0099.2024.135.1.29
7. Paustenbach D. (Ed.) Human and Ecological Risk Assessment: Theory and Practice. Wiley: Hoboken, NY, USA. 2015.
8. Оцінка сумісного пестицидного та кадмієвого навантаження на ґрунт з використанням вищих рослин / С.В. Хижняк та ін. *Агробіологія*. 2022. № 1. С. 71–78. doi: 10.33245/2310-9270-2022-171-1-71-78
9. Жирнов В.В., Савченко Д.А. Біоконверсія відходів: підручник (Частина 1). Київ: ДДП Експо-Друк, 2017. 302 с.
10. Войціцький В.М., Хижняк С.В., Коверсун І.В., Довбиш О.Б. Характеристика екологічних ризиків в екосистемах та оцінка можливості їх прояву. *Агробіологія*. 2023. № 1. С. 61 – 69. doi:10.33245/2310-9270-2023-179-1-61-69
11. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. Визначення надійності екосистем до чинника антропогенного тиску. *Екологічна безпека та природокористування*. 2017. № 3 – 4. С. 50 – 57.
12. Надійність агроекосистем: підходи щодо її оцінки та підвищення/ В.М. Войціцький та ін. *Таврійський науковий вісник*. 2021. № 118. С. 327 – 333. doi:10.32851/2226-0099.2021.118.41
13. Приседський Ю.Г., Лихолат Ю.В. Адаптація рослин до антропогенних чинників: підручник. Вінниця: ТОВ «Нілан-ЛТД», 2017. 98 с.
14. Участь адаптивного потенціалу біологічних систем у формуванні їх надійності/ В.М. Войціцький та ін. *Екологічні науки*. 2024. № 1. Вип. 52. С. 119 – 123. doi:10.32846/2306-9716/2024.eco.1-52.2.22

15. Герасимчук Л.О. Військові дії як чинник утворення відходів. *Таврійський науковий вісник*. 2023. № 133. С. 305-312. doi:10.32782/2226-0099.2023.133.41
16. Сакун А.О., Кутковий Д.О. Оцінка впливу наслідків військових дій на ґрунти. *Екологічні науки*. 2025. № 1. Вип. 58. С. 350 – 353. doi:10.32846/2306-9716/2025.eco.1-58.56
17. Dmytrukha N.M., Kozlov K.P., Herasimova O.V. Soil contamination with heavy metals: a hygienic concern. *Ukrainian Journal of Occupational Health*. 2024. Vol. 20. № 1. P. 66 –75. doi:10.33573/ujoh2024.01.066
18. Моделирование миграции экотоксикантов у компонентах агроэкосистем / В.М. Войціцький та ін. *Агроекологічний журнал*. 2019. № 1. С. 36 – 41. doi: 10.33730/2077-4893.1.2019.163246
19. Застосування рослинних тест-систем для оцінки комбінованої дії факторів різної природи / Д.М. Гродзинський та ін. Київ: Фітосоціоцентр, 2006. 103 с.
20. Основні підходи для комплексної оцінки забруднення ґрунтів внаслідок військових дій/ С.В. Хижняк та ін. *Екологічні науки*. 2025. № 5. Вип. 62. ч.1. С. 189 – 194. doi:10.32846/2306-9716/2025.eco.5-62.1.28

Дата першого надходження статті до видання: 29.06.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026