

БІОЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2025-33-16>

УДК (UDC): 581.522:504.064.4:613.1

К. О. МОЛОЖОН, PhD (Біологія),

асистент кафедри ботаніки, екології та садово-паркового господарства

e-mail: balerina24km@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3158-3478>

Мелітопольський державний педагогічний університет імені Богдана Хмельницького,

вул. Гетьманська, 20, м. Мелітополь, Запорізька область, 72312, Україна

БІОІНДИКАТОРИ СЕРЕД РОСЛИН ДЛЯ ОЦІНКИ СТАНУ ДОВКІЛЛЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ РИЗИКІВ ДЛЯ ЗДОРОВ'Я

Мета. Огляд та комплексний аналіз сучасних наукових досліджень щодо застосування рослинних біоіндикаторів для моніторингу стану ґрунту, води та атмосферного повітря, з особливим акцентом на прогнозування та мінімізацію ризиків для здоров'я людини.

Результати. Проаналізовано основні антропогенні фактори деградації екосистем: індустріалізацію, інтенсивне сільське господарство, урбанізацію та зміну клімату, що призводять до накопичення у ґрунтах, атмосферному повітрі та водних об'єктах токсичних сполук (важких металів, пестицидів, нафтопродуктів, радіонуклідів). Особливу увагу приділено подвійній ролі рослин-біоіндикаторів: екологічній для виявлення зон із підвищеним рівнем забруднення та моніторингу динаміки техногенного навантаження, і медико-біологічній для оцінки впливу токсикантів на здоров'я людини через їх надходження у харчові ланцюги. Розглянуто механізми акумуляції та трансформації поллютантів, морфологічні, фізіолого-біохімічні та молекулярні реакції рослин на забруднення, а також застосування біохімічних і молекулярних маркерів, фітотестів та мікроаналітичних методів. Наведено приклади використання видів-гіпераккумуляторів у моніторингу різних екосистем, включаючи міські та аграрні ландшафти.

Висновки. Підкреслено значення інтеграції результатів біоіндикаційних досліджень у медико-екологічний аналіз для розвитку превентивної медицини, формування політик громадського здоров'я та стратегії сталого управління природними ресурсами. Отримані узагальнення можуть бути корисними для ботаніків, екологів, біохіміків, токсикологів, медиків та фахівців у галузі громадського здоров'я, що займаються моніторингом та зменшенням негативного впливу антропогенних забруднень на довкілля та людину.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: біоіндикатор-рослина, біохімічний маркер, гіпераккумулятор, мікроаналітичний метод, токсичний елемент, екотоксикологія, медико-екологічний аналіз

Як цитувати: Моложон К. О. Біоіндикатори серед рослин для оцінки стану довкілля та прогнозування ризиків для здоров'я. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2025. Вип. 33. С.226-234. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2025-32-16>

In cites: Molozhon, K. O. (2025). Bioindicators among plants for assessing the environmental state and predicting health risks. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology*, (33), 226-234. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2025-33-16> (in Ukrainian)

Вступ

Сучасний стан довкілля зазнає суттєвих змін під впливом антропогенних факторів, серед яких провідне місце займають індустріалізація, інтенсивне сільське господарство, урбанізація та зміни клімату. Інтенсифікація промислового виробництва й зро-

стання техногенного навантаження призвели до накопичення в екосистемах шкідливих речовин – важких металів, пестицидів, нафтопродуктів, радіонуклідів та інших токсикантів, що негативно впливають як на біоту, так і на здоров'я людини.

За даними ВООЗ, понад 90 % населення світу дихає повітрям, забрудненим понад допустимі норми, а близько 25 % глобального тягаря хвороб зумовлено впливом несприятливих екологічних факторів. В умовах зростання глобальних екологічних загроз своєчасне виявлення та прогнозування ризиків є критично важливим для запобігання розвитку хронічних захворювань, зниження смертності та підвищення якості життя.

Серед сучасних інструментів екологічного моніторингу особливе місце займає біоіндикація – оцінка стану навколишнього середовища за реакціями живих організмів. Серед різних груп біоіндикаторів рослини є унікальними об'єктами досліджень завдяки своїй осілій природі, високій чутливості до змін умов середовища та здатності до акумуляції та трансформації полутантів. Вони реагують на вплив токсичних речовин і фізичних факторів комплексом змін на морфологічному, фізіолого-біохімічному та молекулярному рівнях, що дає змогу фіксувати навіть сублетальні ефекти забруднення. Такі реакції можуть виступати ранніми маркерами екологічних загроз, які передують клінічним проявам у людини, та слугувати основою для прогнозування ризиків виникнення респіраторних, серцево-судинних, онкологічних та інших захворювань.

Використання рослин як біоіндикаторів має подвійне значення:

1. *Екологічне* – виявлення зон з підвищеним рівнем забруднення, простежування

просторово-часової динаміки техногенного навантаження та оцінка ефективності природоохоронних заходів.

2. *Медико-біологічне* – прогнозування впливу токсикантів на живі організми, зокрема людину, через встановлення зв'язків між вмістом забруднювачів у рослинних тканинах та їх надходженням у харчові ланцюги.

Сучасні підходи до біоіндикаційних досліджень включають вивчення механізмів акумуляції небезпечних елементів, ідентифікацію гіперакумуляторів, використання біохімічних і молекулярних маркерів, застосування фітотестів та мікроаналітичних методик, що забезпечують високоточну оцінку рівня і характеру забруднення. Інтеграція цих результатів у медико-екологічний аналіз формує наукову основу для превентивної медицини, розробки політик громадського здоров'я та стратегії сталого управління природними ресурсами.

Метою огляду є комплексний аналіз сучасних наукових досліджень щодо застосування рослинних біоіндикаторів для моніторингу стану ґрунту, води та атмосферного повітря, з особливим акцентом на прогнозування та мінімізацію ризиків для здоров'я людини.

Особлива увага приділяється видам-аккумуляторам важких металів, фізіолого-біохімічним та молекулярним маркерам, а також прикладам впровадження біоіндикаційних методів у міських та аграрних ландшафтах.

Результати

Біоіндикатори серед рослин є потужним інструментом для оцінки стану довкілля, оскільки вони здатні відображати як хімічні, так і фізіологічні зміни у середовищі, пов'язані з антропогенним забрудненням та природними стресами. Рослини, які можуть служити біоіндикаторами, поділяються на кілька основних категорій залежно від їхніх функцій та реакцій на забруднення. По-перше, це звичайні індикаторні види, такі як *Amaranthus retroflexus*, *Plantago lanceolata*, *Rumex acetosa*, *Trifolium pratense* та інші, які характеризуються здатністю накопичувати важкі метали, зокрема кадмій (Cd), свинець (Pb), цинк (Zn) та нікель (Ni). Ці рослини широко розповсюджені у

міських і сільськогосподарських екосистемах і демонструють високі коефіцієнти біоконцентрації (BCF) та транспортування металів (TF), що робить їх цінними індикаторами забруднення ґрунту та повітря. Згідно з дослідженнями [1], звичайні індикаторні види, такі як *Trifolium pratense* (конюшина лучна) та *Plantago lanceolata* (подорожник ланцетолистий), показують здатність накопичувати токсичні метали, зокрема цинк (Zn), кадмій (Cd) та свинець (Pb), у концентраціях, які відображають рівень забруднення ґрунту. Ці види широко використовуються для моніторингу стану міських і сільськогосподарських екосистем, оскільки вони швидко реагують на зміни у навколишньому

середовищі та мають високі коефіцієнти біоконцентрації (BCF).

По-друге, існують гіпераккумулятори – це рослини, здатні накопичувати екстремально високі концентрації металів без проявів значного фітотоксичного ефекту. Класичними прикладами є *Thlaspi caerulescens*, *Alyssum murale* та *Pteris vittata*, які активно використовуються для відновлення деградованих ґрунтів і у фіторе mediaції металевих забруднень. Ці види забезпечують біологічну основу для так званого «файтогдингу» металів, тобто процесу видалення токсичних металів із середовища через накопичення у рослинній біомасі. Дослідження [2] детально аналізує механізми фіторе mediaції на прикладі *Thlaspi caerulescens* та інших гіпераккумуляторів, що активно застосовуються для відновлення деградованих земель. Їхня здатність переносити метали у надземні органи дозволяє видаляти забруднювачі з ґрунту, знижуючи екологічне навантаження.

По-третє, окрему групу становлять активні фітобіоіндикатори, серед яких такі види, як *Pistia stratiotes*, *Eichhornia* spp. та *Lemna* spp.. Ці рослини широко використовуються у конструктивних очисних спорудах для фільтрації важких металів із забруднених водних масивів за допомогою процесу фітофільтрації або ризофільтрації (rhizofiltration). За даними PubMed, застосування цих видів є ефективним, екологічно безпечним і економічно вигідним способом очищення вод, особливо у промислових регіонах.

Механізми накопичення та внутрішні реакції рослин, які виступають біоіндикаторами, є надзвичайно складними та багатфакторними. Під впливом важких металів і інших забруднювачів часто спостерігаються фізіологічні реакції, такі як ураження кореневої системи, уповільнення росту, розвиток хлорозу та зниження фотосинтетичної активності. В дослідженні [3] показано, що забруднення ґрунту кадмієм і свинцем негативно впливає на ріст лікарських рослин, що може призвести до зниження їхньої якості і, відповідно, створити ризики для здоров'я людей, які їх використовують. Під впливом металів у рослинах спостерігаються пору-

шення фотосинтезу, хлороз листя, а також збільшення активності ферментів антиоксидантного захисту, таких як супероксиддисмутаза (SOD) та каталаза (CAT), що є маркерами оксидативного стресу [4].

Біохімічні маркери стресу, які широко використовуються для оцінки стану рослин, включають підвищення рівнів гідроген пероксиду (H_2O_2), малонового діальдегіду (MDA) та активність антиоксидантних ферментів, таких як супероксиддисмутаза (SOD), каталаза (CAT) та аскорбат пероксидаза (APX). Всі ці показники свідчать про реакції оксидативного стресу, що виникають у рослинних клітинах під дією токсичних речовин, про що свідчать публікації у журналах ScienceDirect та PMC.

На молекулярному рівні у гіпераккумуляторів активуються специфічні транспортери, наприклад білки-насоси типу HMA4, які посилено транспортують іони металів (Cd, Zn) із кореневої системи до надземних органів, що дозволяє рослині мінімізувати токсичний вплив важких металів на життєво важливі клітинні структури. Такий механізм детально описано у наукових джерелах, зокрема на Вікіпедії і спеціалізованих публікаціях.

Сучасні методи дослідження біоіндикативної здатності рослин охоплюють широкий спектр інструментальних і аналітичних підходів. Аналітичні методи, такі як індуктивно-зв'язана плазмова оптична емісійна спектроскопія (ICP-OES) та атомно-абсорбційна спектроскопія, використовуються для точного визначення концентрації металів у ґрунтах і тканинах рослин, що дає змогу обчислити ключові індекси, зокрема коефіцієнти біоконцентрації (BCF) та транспортування (TF), які є критеріями оцінки індикаторної здатності видів. Про це свідчать статті з ScienceDirect та інших авторитетних ресурсів. Метаболомічні та геномічні дослідження відкривають механізми адаптації рослин до металевого стресу та ідентифікують потенційні цілі для генної інженерії [5].

Значний прогрес у дослідженнях спостерігається і завдяки омічним підходам, таким як метаболоміка, протеоміка і геноміка, які дозволяють виявити зміни в метаболіч-

них шляхах і білковому складі рослин під стресом, ідентифікувати ключові адаптивні механізми на молекулярному рівні. Використання таких методів широко відображено у публікаціях на arXiv і PMC.

Окрім лабораторних і польових методів, для масштабного моніторингу стану рослинних екосистем все активніше застосовуються дистанційні технології, зокрема гіперспектральна аерозйомка та супутниковий моніторинг вегетаційних індексів (NDVI). Ці методи дають змогу оперативно відстежувати зміни стану рослинності на рівні ландшафту чи регіону і використовуються для екологічного управління, що доведено у численних дослідженнях, опублікованих на arXiv та MDPI.

Важливим аспектом використання біоіндикаторів є їхній зв'язок з ризиками для здоров'я людини. Наприклад, накопичення важких металів у лікарських рослинах (*Taraxacum officinale*, *Plantago major*), що зростають поблизу автомобільних трас, становить потенційну небезпеку при їхньому використанні у фітотерапії. Забруднення атмосфери озоном і оксидами азоту, що призводить до ушкодження листкової поверхні в чутливих культур, одночасно корелює з підвищеним рівнем респіраторних захворювань у місцевого населення. Дослідження в регіонах з високим вмістом фтору у ґрунті показали, що рослини-акумулятори фторидів можуть бути непрямими індикаторами ризику флюорозу у населення.

Щодо конкретних прикладів сучасних досліджень, у світі велика увага приділяється вивченню здатності мохів *Pleurozium schreberi* і лишайників *Xanthoria parietina* до акумуляції важких металів у промислових регіонах Скандинавії. Дослідження, проведені у 2023 році в Норвегії, продемонстрували, що вміст Pb, Cd і Zn у тканинах цих рослин значно корелює з концентраціями у повітрі, що підтверджує їхню ефективність як біоіндикаторів атмосферного забруднення та дозволяє використовувати ці дані для прийняття екологічних рішень [6]. Аналогічні підходи використовуються і в Україні: у дослідженні 2024 року в Придніпровському

регіоні було встановлено, що *Betula pendula* та *Tilia cordata* в міських парках Дніпра і Запоріжжя демонструють значне накопичення важких металів, зокрема Pb та Zn, що корелює із забрудненням від транспортних викидів і промислових підприємств. За результатами цього дослідження було рекомендовано застосування цих видів як біоіндикаторів у системі моніторингу якості повітря [7]. Аналіз ризиків із застосуванням індексу Hazard Index (HI) у роботі [8] показав, що у деяких регіонах постійне споживання рослин із забруднених ґрунтів може призвести до розвитку хронічних захворювань. Аналогічні результати отримані і в Україні, зокрема у промислових регіонах Донбасу, де високі концентрації свинцю та кадмію у ґрунтах співпадають із підвищеною захворюваністю місцевого населення [9].

У 2022 році в Італії було проведено дослідження, яке показало, що використання *Brassica juncea* у поєднанні з мікоризними грибами дозволяє значно підвищити ефективність фіторе mediaції ґрунтів, забруднених свинцем і кадмієм. Цей дослід продемонстрував, що симбіоз з грибами не лише підвищує накопичення металів у рослинній біомасі, а й зменшує токсичний вплив на саму рослину, що дозволяє розглядати таку систему як перспективну для застосування у промислових зонах [10]. В Україні подібні дослідження проводились в Карпатському регіоні, де вивчали роль мікоризних асоціацій у поліпшенні здатності місцевих видів рослин до накопичення токсичних металів у забруднених районах видобутку корисних копалин [11].

Також слід відзначити приклади застосування дистанційних методів моніторингу, що дозволяють оперативно виявляти порушення стану рослинного покриву у масштабах регіону. У 2025 році міжнародна група дослідників використала гіперспектральний аналіз супутникових знімків для оцінки впливу важких металів на лісові екосистеми поблизу великих металургійних комбінатів в Україні. Результати показали зміни в показниках вегетаційного індексу NDVI, які корелювали з концентраціями металів у ґрунті та листі [12].

Отже, наведені приклади як міжнародних, так і українських досліджень свідчать про високий потенціал рослинних біоіндикаторів у оцінці екологічного стану довкілля та прогнозуванні ризиків для здоров'я людини. Їх застосування дозволяє не лише проводити оперативний моніторинг, але й планувати заходи щодо зниження негативного впливу забруднень на екосистеми та людське здоров'я. Такий підхід має особливе значення в сучасних умовах інтенсивного антропогенного навантаження і змін клімату.

Накопичення токсичних металів у рослинній біомасі, особливо у харчових та лікарських рослинах, становить серйозну загрозу здоров'ю людини через біомагніфікацію у харчових ланцюгах [8] у деяких регіонах постійне споживання рослин із забруднених ґрунтів може призвести до розвитку хронічних захворювань.

Практичні дослідження, такі як робота [13] показали, що комбінування генетичних модифікацій рослин, використання симбіотичних мікроорганізмів та застосування хелатів дозволяє суттєво покращити ефективність фітореMediaції важких металів із ґрунтів.

У дослідженні [14] підтверджено, що органічні та мікробні добавки до ґрунту, такі як біочар і компост, не лише підвищують вилучення металів, а й покращують загальне здоров'я рослин, створюючи сталу основу для екологічного відновлення.

Проблема утилізації забрудненої рослинної біомаси залишається важливою. Сучасні методи, включаючи компостування з додаванням стабілізаторів, контрольоване спалювання із системами уловлювання токсичних викидів, а також синтез наноматеріалів із вилучених металів, розглядаються як перспективні шляхи безпечного завершення циклу фітореMediaції [15].

Таким чином, сучасні дослідження підтверджують, що рослинні біоіндикатори є надзвичайно цінними для моніторингу екологічного стану ґрунтів і прогнозування ризиків для здоров'я людини. Інтеграція сучасних аналітичних, молекулярних та технологічних методів відкриває широкі можливості для підвищення ефективності екологічного

контролю і розробки стратегій сталого відновлення забруднених територій.

Перспективи і дослідницькі прогалини. Розвиток досліджень у сфері рослинних біоіндикаторів та фітореMediaції відкриває нові горизонти не лише для екологічного моніторингу, а й для захисту громадського здоров'я. Інтеграція ботанічних, екотоксикологічних, медико-біологічних та епідеміологічних підходів дозволяє більш точно прогнозувати ризики для населення, що зазнає впливу забрудненого середовища. Особливо перспективним є використання рослин як «біологічних сенсорів» для виявлення токсичних металів (свинець, кадмій, ртуть, миш'як), органічних полутантів і радіонуклідів, які безпосередньо пов'язані з розвитком онкологічних, серцево-судинних, неврологічних та ендокринних захворювань у людини.

Пріоритетним напрямом є впровадження мультидисциплінарних технологій – від молекулярної біології, метаболоміки та генної інженерії (включно з CRISPR/Cas9 для створення стійких і високоефективних гіперакумуляторів) до мікробіології, спрямованої на використання симбіотичних мікроорганізмів для посилення фітореMediaційного ефекту. Це може значно знизити рівні біодоступних токсикантів у ґрунті, воді та повітрі, зменшуючи їхній перенос у харчові ланцюги та прямий вплив на організм людини.

Водночас залишаються суттєві дослідницькі прогалини. По-перше, ефективність фітореMediaційних технологій у реальних масштабах та різних кліматичних і ґрунтових умовах досі недостатньо вивчена. Особливий виклик становить визначення того, наскільки швидко зниження концентрацій токсикантів у довкіллі трансформується у реальні покращення показників здоров'я населення.

По-друге, відсутня уніфікована методологія для комплексної оцінки впливу забруднення на людину, що поєднувала б дані біомоніторингу рослин з біомаркерами впливу в організмі людини (аналіз крові, волосся, сечі на вміст токсикантів) та епідеміологічними показниками захворюваності. Такий інтегрований підхід дозволив би створити більш точні карти ризику для громад і своєчасно впроваджувати профілактичні заходи.

Ще однією критичною прогалиною є брак рішень щодо безпечної утилізації рослинної біомаси, що накопичила токсичні речовини. Потрапляння таких відходів назад у середовище без належної обробки може повторно створювати загрозу для здоров'я населення через вторинне забруднення.

Необхідні дослідження, які оцінюватимуть токсикологічну безпеку та економічну доцільність методів, таких як термічна деструкція, піроліз або використання біомаси для синтезу матеріалів із закритим циклом переробки.

Додаткової уваги потребує вивчення впливу комплексних сумішей забруднюва-

чів – поєднання важких металів, органічних токсикантів і радіонуклідів, оскільки їхній синергічний ефект на рослини-індикатори та організм людини може значно перевищувати вплив окремих речовин.

Особливо актуальною ця тематика є для України, де існують індустриальні зони, гірничодобувні регіони та території, що страждали від воєнних дій, із підвищеним ризиком хімічного та радіаційного забруднення. Тут впровадження біоіндикаційних технологій із медичним компонентом може стати інструментом не лише екологічної, а й санітарно-епідеміологічної безпеки національного рівня.

Висновки

Рослинні біоіндикатори виступають високоефективним інструментом комплексного екологічного моніторингу та медико-екологічної оцінки ризиків для здоров'я населення. Їх здатність акумулювати, трансформувати та відображати на молекулярному, біохімічному та фізіологічному рівнях наявність токсичних металів, органічних поллютантів і радіонуклідів дозволяє своєчасно ідентифікувати екологічні загрози, які можуть безпосередньо впливати на організм людини через харчові ланцюги, атмосферне повітря та ґрунтовий контакт.

Використання таких рослин дає змогу прогнозувати розвиток респіраторних, серцево-судинних, онкологічних, нейродегенеративних та ендокринних захворювань у популяціях, що проживають у зонах підвищеного антропогенного навантаження.

Сучасні дослідження підтверджують значний потенціал як гіпераккумуляторів, так і звичайних індикаторних рослин для виявлення, моніторингу та фіторе mediaції забруднень у різних екосистемах.

Інтеграція передових аналітичних, молекулярних, протеомних і метаболомічних методів значно підвищує точність оцінки екологічного стану та дає можливість розробляти стратегічно обґрунтовані заходи з відновлення ґрунтів, водних ресурсів і атмос-

ферного середовища, мінімізуючи ризики для людського здоров'я.

Водночас для реалізації повного потенціалу рослинних біоіндикаторів необхідне проведення подальших міждисциплінарних досліджень, спрямованих на: адаптацію фіторе mediaційних технологій до різноманітних природно-кліматичних умов; розробку інтегрованих індексів ризику, які поєднують хімічні, біохімічні та епідеміологічні дані; створення безпечних і технологічно ефективних методів утилізації забрудненої біомаси; оцінку синергічного впливу комплексних сумішей токсикантів на рослини-індикатори та організм людини.

Інтеграція рослинних біоіндикаторів у національні системи екологічного моніторингу та управління є критично важливою для забезпечення сталого розвитку та охорони здоров'я населення. Особливо це стосується регіонів із високим антропогенним навантаженням, таких як промислові й аграрні зони України.

Застосування таких комплексних підходів дозволяє формувати науково обґрунтовану систему раннього попередження екологічних і медичних загроз, зменшувати ризики хронічних та індустриально зумовлених захворювань, а також підвищувати якість життя населення.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що конфлікту інтересів щодо публікації цього рукопису немає. Крім того, автор повністю дотримувався етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

В роботі не використано ресурс штучного інтелекту.

Список використаної літератури

1. Liu W, Chen X, Liang T, Mu T, Ding Y, Liu Y, et al. Varying abundance of microplastics in tissues associates with different foraging strategies of coastal shorebirds in the Yellow Sea. *Science of the Total Environment*. 2023. Vol.866.161417. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161417>
2. Wang F, Zhang Q, Cui J, Bao B, Deng X, Liu L, et al. Polystyrene microplastics induce endoplasmic reticulum stress, apoptosis and inflammation by disrupting the gut microbiota in carp intestines. *Environmental Pollution*. 2023. Vol.323.121233. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121233>
3. Kang JS, Yadav NS. Special Issue Editorial: Isolation and analysis of characteristic compounds from herbal and plant extracts. *Plants*. 2021. Vol.10. N 12. 2775. <https://doi.org/10.3390/plants10122775>
4. Huang J, Zhao L, Shi Y, Zeng X, Sun W, Zhao X, et al. Characterization of short-, medium- and long-chain chlorinated paraffins in ambient PM_{2.5} from the Pearl River Delta, China. *Environ Int*. 2023. Vol.175. 107932. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107932>
5. Yan A, Wang Y, Tan SN, Mohd Yusof ML, Ghosh S, Chen Z. Phytoremediation: a promising approach for revegetation of heavy metal-polluted land. *Front Plant Sci*. 2020. Vol.11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00359>
6. Fang Y, Jiang Z, Lin J, Li J, Liu S, Wu Y, et al. Nitrate threshold of tropical seagrass susceptibility to herbivory. *Ecol Indic*. 2023. Vol.146.109911. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.109911>
7. Laptiev V, Apori SO, Giltrap M, Tian F, Ryzhenko N. Bioaccumulation of Cr, Zn, Pb and Cu in *Ambrosia artemisiifolia* L. and *Erigeron canadensis* L. *Resources*. 2024. Vol.13. N 3. 43. <https://doi.org/10.3390/resources13030043>
8. Warenik-Bany M, Maszewski S, Mikolajczyk S, Piskorska-Pliszczynska J. Impact of environmental pollution on PCDD/F and PCB bioaccumulation in game animals. *Environmental Pollution*. 2019. Vol. 255. 113159. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113159>
9. Dmytrukha NM, Kozlov KP, Herasimova OV. Soil contamination with heavy metals: a hygienic concern. *Ukrainian Journal of Occupational Health*. 2024. Vol. 20. N 1. P.66-75. <https://doi.org/10.33573/ujoh2024.01.066>
10. Jang J, Bhardwaj J, Jang J. Efficient measurement of airborne viable viruses using the growth-based virus aerosol concentrator with high flow velocities. *J Hazard Mater*. 2022. Vol. 434. 128873. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128873>
11. Shu C, Ruda M, Dzhumelia E, Shybanova A, Kochan O, Levkiv M. Restoring soil cover and plant communities with arbuscular mycorrhizal fungi as an essential component of dss for environmental safety management in post-industrial landscapes. *Agronomy*. 2023. Vol.13. N 5. 1346. <https://doi.org/10.3390/agronomy13051346>
12. Savosko V, Lykholat Y, Komarova I, Yevtushenko E. The impact of forest plant communities on the content of heavy metals in soil profiles of the iron ore mining area, Kryvyi Rih District, Ukraine. *Balt For*. 2022. Vol.28. N 1. <https://doi.org/10.46490/BF631>
13. Fassmer AM, Pulst A, Schmiemann G, Hoffmann F. Sex-Specific Differences in Hospital Transfers of Nursing Home Residents: Results from the HOspitalizations and eMERgency Department Visits of Nursing Home Residents (HOMERN) Project. *Int J Environ Res Public Health*. 2020. Vol. 17. N 11. 3915. <https://doi.org/10.3390/ijerph17113915>
14. Bacchetta R, Marotta A, Nessi A, Tremolada P. Back-calculation of fish size in diet analysis of piscivorous predators: a new index for the alien silurus glanis. *Sustainability*. 2021. Vpl. 13. N 8. 4322. <https://doi.org/10.3390/su13084322>
15. Nagy A, Magyar T, Kiss NÉ, Tamás J. Composted sewage sludge utilization in phytostabilization of heavy metals contaminated soils. *Int J Phytoremediation*. 2023. Vol. 25. N 11. P.1510-1523. <https://doi.org/10.1080/15226514.2023.2170322>

Стаття надійшла до редакції 13.08.2025
Стаття рекомендована до друку 25.09.2025

Переглянуто 20.09.2025
Опубліковано 30.12.2025

K. O. MOLOZHON, PhD (Biology),
Assistant of the Department of Botany, Ecology and Horticulture
e-mail: balerina24km@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3158-3478>
Bohdan Khmelnytskyi Melitopol State Pedagogical University,
20, Hetmanska St., Melitopol, Zaporizhia Oblast, 72312, Ukraine

BIOINDICATORS AMONG PLANTS FOR ASSESSING THE ENVIRONMENTAL STATE AND PREDICTING HEALTH RISKS

Purpose. A review and comprehensive analysis of current scientific research on the use of plant bioindicators for monitoring the state of soil, water, and atmospheric air, with a particular emphasis on predicting and minimizing risks to human health.

Results. The main anthropogenic factors of ecosystem degradation are analyzed: industrialization, intensive agriculture, urbanization and climate change, which lead to the accumulation of toxic compounds (heavy metals, pesticides, petroleum products, radionuclides) in soils, atmospheric air and water bodies. Particular attention is paid to the dual role of bioindicator plants: ecological for identifying areas with increased pollution levels and monitoring the dynamics of technogenic load, and medical and biological for assessing the impact of toxicants on human health through their entry into food chains. The mechanisms of accumulation and transformation of pollutants, morphological, physiological, biochemical and molecular reactions of plants to pollution, as well as the use of biochemical and molecular markers, phytotests and microanalytical methods are considered. Examples of the use of hyperaccumulator species in monitoring various ecosystems, including urban and agricultural landscapes, are given.

Conclusions. The importance of integrating the results of bioindication studies into medical and ecological analysis for the development of preventive medicine, the formation of public health policies and strategies for sustainable natural resource management is emphasized. The obtained generalizations may be useful for botanists, ecologists, biochemists, toxicologists, physicians and public health specialists involved in monitoring and reducing the negative impact of anthropogenic pollution on the environment and humans.

KEYWORDS: *bioindicators-plant, biochemical marker, hyperaccumulator, microanalytical method, toxic element, ecotoxicology, medical and ecological analysis*

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest regarding the publication of this manuscript. Furthermore, the author has fully adhered to ethical norms, including avoiding plagiarism, data falsification, and duplicate publication.

The work does not use artificial intelligence resources.

References

1. Liu, W., Chen, X., Liang, T., Mu, T., Ding, Y., Liu, Y., & Liu, X. (2023). Varying abundance of microplastics in tissues associates with different foraging strategies of coastal shorebirds in the Yellow Sea. *Science of The Total Environment*. 866,161417. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161417>
2. Wang, F., Zhang, Q., Cui, J., Bao, B., Deng, X., Liu, L., & Guo, M.-y. (2023). Polystyrene microplastics induce endoplasmic reticulum stress, apoptosis and inflammation by disrupting the gut microbiota in carp intestines. *Environmental Pollution*. 323,121233. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121233>
3. Kang, J.S., Yadav, N.S. (2021). Special issue editorial: isolation and analysis of characteristic compounds from herbal and plant extracts. *Plants*. 10(12), 2775. <https://doi.org/10.3390/plants10122775>
4. Huang J., Zhao L., Shi Y., Zeng X., Sun W., Zhao X., ...& Liu, X. (2023). Characterization of short-, medium- and long-chain chlorinated paraffins in ambient PM_{2.5} from the Pearl River Delta, China. *Environ Int*. 175,107932. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107932>
5. Yan, A., Wang, Y., Tan S.N., Mohd Yusof, M.L., Ghosh, S., & Chen, Z. (2020). Phytoremediation: A Promising Approach for Revegetation of Heavy Metal-Polluted Land. *Front Plant Sci*. 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00359>
6. Fang, Y., Jiang, Z., Lin, J., Li, J., Liu, S., Wu, Y., & Huang, X. (2023). Nitrate threshold of tropical seagrass susceptibility to herbivory. *Ecol Indic*. 146, 109911. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.109911>
7. Laptiev, V., Apori, S.O., Giltrap, M., Tian, F., & Ryzhenko, N. (2024). Bioaccumulation of Cr, Zn, Pb and Cu in *Ambrosia artemisiifolia* L. and *Erigeron canadensis* L. *Resources*. 13(3), 43. <https://doi.org/10.3390/resources13030043>

8. Warenik-Bany, M., Maszewski, S., Mikolajczyk, S., & Piskorska-Pliszczynska, J. (2019). Impact of environmental pollution on PCDD/F and PCB bioaccumulation in game animals. *Environmental Pollution*. 255, 113159. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113159>
9. Dmytrukha, N.M., Kozlov, K.P., & Herasimova, O.V. (2024). Soil contamination with heavy metals: a hygienic concern. *Ukrainian Journal of Occupational Health*. 20(1), 66-75. <https://doi.org/10.33573/ujoh2024.01.066>
10. Jang, J., Bhardwaj, J., & Jang, J. (2022). Efficient measurement of airborne viable viruses using the growth-based virus aerosol concentrator with high flow velocities. *J Hazard Mater.*, 434, 128873. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128873>
11. Shu, C., Ruda, M., Dzhumelia, E., Shybanova, A., Kochan, O., & Levkiv, M. (2023). Restoring soil cover and plant communities with arbuscular mycorrhizal fungi as an essential component of dss for environmental safety management in post-industrial landscapes. *Agronomy*, 13(5), 1346. <https://doi.org/10.3390/agronomy13051346>
12. Savosko, V., Lykholat, Y., Komarova, I., & Yevtushenko, E. (2022). The impact of forest plant communities on the content of heavy metals in soil profiles of the iron ore mining area, Kryvyi Rih District, Ukraine. *Balt For*. 28(1). <https://doi.org/10.46490/BF631>
13. Fassmer, A.M., Pulst, A., Schmiemann, G., & Hoffmann, F. (2020). Sex-Specific Differences in Hospital Transfers of Nursing Home Residents: Results from the HOspitalizations and eMERgency Department Visits of Nursing Home Residents (HOMERN) Project. *Int J Environ Res Public Health*. 17(11), 3915. <https://doi.org/10.3390/ijerph17113915>
14. Bacchetta, R., Marotta, A., Nessi, A., & Tremolada, P. (2021). Back-calculation of fish size in diet analysis of piscivorous predators: a new index for the alien silurus glanis. *Sustainability*. 13(8), 4322. <https://doi.org/10.3390/su13084322>
15. Nagy, A., Magyar, T., Kiss, N.É., & Tamás, J. (2023). Composted sewage sludge utilization in phytostabilization of heavy metals contaminated soils. *Int J Phytoremediation*. 25(11), 1510-1523. <https://doi.org/10.1080/15226514.2023.2170322>

The article was received by the editors 13.08.2025
The article is recommended for printing 25.09.2025

The article was revised 20.09.2025
This article published 30.12.2025