

БІОІНДИКАЦІЙНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ҐРУНТОВИХ БЕЗХРЕБЕТНИХ В ЕКОСИСТЕМАХ ІЗ РІЗНИМ РІВНЕМ АНТРОПОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Бусленко Леся Володимирівна,

кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри зоології, факультету біології та лісового господарства
Волинського національного університету імені Лесі Українки
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4626-9019>

Теплюк Вадим Сергійович,

кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри зоології, факультету біології та лісового господарства,
Волинського національного університету імені Лесі Українки
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0611-2797>

Іванців Володимир Васильович,

доктор біологічних наук, професор, професор кафедри зоології, факультету біології та лісового господарства
Волинського національного університету імені Лесі Українки
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8715-9529>

У статті наведено результати дослідження біоіндикаційної ефективності ґрунтових безхребетних у межах чотирьох типів екосистем із різним рівнем антропогенного навантаження (умовно-природна, агроекосистема, урбанізована, техногенна), розташованих у межах Волинської області. Умовно-природна ділянка (Ботанічний заказник загальнодержавного значення «Воротнів» поблизу м. Луцьк) характеризувалася найвищими значеннями показників: чисельність мезофауни становила 1212 екз./м², кількість таксонів – 14, індекс Шеннона – 2,18, індекс домінування Сімпсона (D) – 0,87. У техногенній зоні (промислова територія поблизу ПрАТ «Цумань» у селищі Цумань) чисельність мезофауни знижувалась до 528 екз./м², що відображає істотне зменшення біотичного різноманіття внаслідок деградаційних змін ґрунтового середовища. В агроекосистемі (сільськогосподарські угіддя поблизу села Гірка Полонка) та урбанізованій зоні (зелена смуга центральної частини м. Луцьк) чисельність фауни становила 662 та 734 екз./м², а кількість таксонів – 10 та 9, відповідно. Індекси різноманіття знижувалися за градієнтом порушення: H' змінювався від 2,18 (природна) до 1,12 (техногенна); D – від 0,87 до 0,53. Виявлено сильну позитивну кореляцію між чисельністю безхребетних і вмістом органічної речовини ($R^2 = 0,952$), що вказує на трофічну зумовленість формування угруповань. У стабільних умовах домінували Oribatida, Collembola і Lumbricidae, у техногенній – Collembola (43 %) і Gamasina (31 %), що вказує на домінування пластичних, швидко репродуктивних форм із коротким життєвим циклом. Умовно-природну ділянку характеризувала висока частка сапротрофних форм (сукупно понад 70 %), тоді як у трансформованих екосистемах зростала частка евритопних груп, зокрема мікрофагів із широким екологічним діапазоном. Результати дослідження підтверджують високу чутливість структури мезофауни до антропогенного пресу та обґрунтовують доцільність її використання як надійного індикатора в рамках біомоніторингу для екологічної діагностики ґрунтів, що зазнають техногенного впливу різної інтенсивності.

Ключові слова: мезофауна, біоіндикація, трофічна структура, біомоніторинг, екологічна діагностика, ґрунт.

Buslenko Lesia, Tepluk Vadym, Ivantsiv Volodymyr. Bioindicative Efficiency of Soil Invertebrates in Ecological Systems with Different Levels of Anthropogenic Load

The article presents the results of a study on the bioindicative efficiency of soil invertebrates across four types of ecosystems with varying degrees of anthropogenic pressure (quasi-natural, agroecosystem, urban, and technogenic) located within the Volyn region (Ukraine). The quasi-natural site (Vortniv tract near Lutsk) exhibited the highest ecological indicators: mesofauna density reached 1212 specimens/m², species richness comprised 14 taxa, the Shannon diversity index was 2.18, and the Simpson index ($1 - D$) was 0.87. In the technogenic zone (industrial area near PJSC "Tuman" in the village of Tuman), the mesofauna density decreased to 528 individuals/m², indicating a significant reduction in biotic diversity as a result of soil environment degradation. In the agroecosystem (agricultural lands near the village of Hirka Polonka) and urban site (a green zone in downtown Lutsk), mesofauna densities were 662 and 734 specimens/m², and species richness amounted to 10 and 9 taxa, respectively. Diversity indices declined along the disturbance gradient: H' decreased from 2.18 to 1.12; D from 0.87 to 0.53. A strong positive correlation was found between mesofauna density and soil organic matter content ($R^2 = 0.952$), highlighting the trophic dependence of community structure. Under stable environmental conditions, Oribatida, Collembola, and Lumbricidae were dominant, whereas in the technogenic site Collembola (43%) and Gamasina (31%) prevailed, indicating the dominance of plastic, rapidly reproducing forms with short life cycles. The quasi-natural site was characterized by a high proportion of saprotrophic forms (collectively over 70%), while in transformed ecosystems, the share of eurytopic groups increased, particularly microphages with a broad ecological tolerance. The results confirm the high sensitivity of soil mesofauna structure to anthropogenic stress and justify its application as a reliable indicator within the framework of biomonitoring for ecological diagnostics of grounds experiencing technogenic impact of varying intensity.

Key words: mesofauna, bioindication, trophic structure, biomonitoring, ecological diagnostics, soil.

Вступ. Ґрунтові екосистеми швидко реагують на зміни абіотичних і біотичних чинників, зумовлені антропогенним впливом. Структурні та функціональні характеристики ґрунтової фауни, зокрема безхребетних, можуть змінюватися під впливом забруднення, ущільнення, ерозійних процесів і деградації органічної речовини. Тому склад і чисельність ґрунтових безхребетних розглядаються як інформативні показники для оцінювання екологічного стану середовища [12; 19].

Підходи до використання біоти як індикатора екологічних умов були закладені ще в межах ґрунтової зоології середини ХХ століття. Подальші дослідження довели, що ґрунтові безхребетні – зокрема представники мезофауни – мають високу чутливість до змін у трофічній структурі, вологості, хімічному складі субстрату, що робить їх зручними для індикації локальних екосистемних змін [2; 8]. Особливо це стосується техногенно трансформованих територій і урбанізованих ландшафтів, де класичні фізико-хімічні методи не завжди забезпечують комплексне уявлення про стан ґрунтів.

Результати вітчизняних емпіричних досліджень демонструють стабільну залежність між структурою ґрунтових угруповань і ступенем антропогенного навантаження [3; 8]. Найбільші зміни спостерігаються в чисельності та видовому складі окремих груп ентомобій, олігохет, ізопод та колембол. Водночас результати багатьох досліджень залишаються фрагментарними, що ускладнює формування єдиної системи критеріїв біоіндикації для різних типів ландшафтів. Методичні матеріали, які використовуються у вищій освіті, формують загальні уявлення про підходи до біоіндикації [1; 7], однак не завжди охоплюють кількісні аспекти та типологічну специфіку ґрунтових безхребетних у регіональному контексті.

У зарубіжній практиці біоіндикація за участю безхребетних давно використовується як метод екологічної діагностики ґрунту в урбанізованих, промислових та аграрних зонах [13; 19]. Узагальнення даних про таксономічні групи біоіндикаторів дозволяє ідентифікувати найбільш інформативні групи для цілей біомоніторингу [13, с. 833–834]. Дослідження демонструють тісний зв'язок між видовим складом ґрунтових угруповань і фізико-хімічними характеристиками субстрату, зокрема концентрацією важких металів, рН, вмістом органічної речовини тощо [12; 21]. У міжнародних дослідженнях особливу увагу приділено також використанню біомаркерів – молекулярних і фізіологічних індикаторів впливу забруднювачів [12; 21], що дозволяє виявити деградаційні процеси ще до появи видимих змін у структурі біоти.

Однак і в міжнародному, і у вітчизняному контексті залишається недостатньо дослідженою ефективність біоіндикації в умовах градієнтного антропогенного навантаження, тобто за умов плавної зміни ступеня впливу в межах одного географічного регіону. Відсутність єдиного підходу до кількісної оцінки індикаторного значення окремих груп ускладнює впровадження зооіндикації як стандартного моніторингового інструменту в локальних екосистемах.

Метою дослідження є кількісне оцінювання інформативності основних таксономічних груп ґрунтових безхребетних як біоіндикаторів стану ґрунтів за умов варіативного антропогенного впливу.

Матеріали і методи. Польові дослідження виконувались з березня по листопад 2023 – 2024 років на території Волинської області, в межах лісостепової природної зони, що зумовлено сезонною активністю ґрунтових безхребетних. Ділянки дослідження розташовувалися на чотирьох типових ландшафтних комплексах, що відрізняються інтенсивністю антропогенного навантаження. Агроекосистема охоплювала сільськогосподарські угіддя поблизу села Гірка Полонка, де фіксується тривале застосування мінеральних добрив. Урбанізована територія включала зелену смугу в центральній частині міста Луцька, що зазнає високого техногенного тиску. Умовно-природна ділянка розташовувалась у Ботанічному заказнику загальнодержавного значення «Воротнів», яке зберігає мозаїчну структуру корінних дубово-грабових лісів. Техногенна ділянка розташовувалась у зоні впливу деревообробного підприємства Приватного акціонерного товариства «Цумань» (ПрАТ «Цумань») поблизу селища Цумань Волинської області, яке є джерелом хронічного забруднення ґрунтового середовища внаслідок тривалої діяльності з переробки деревини. Просторове розташування об'єктів і міжпунктові відстані наведено на картосхемі, що дозволяє оцінити регіональну однорідність умов і географічну обґрунтованість вибору ділянок (рис. 1). Вибір зазначених локалітетів зумовлювався необхідністю здійснення цілеспрямованого біомоніторингу ґрунтової мезофауни з метою екологічної діагностики ґрунтів у межах одного природного регіону. Такий підхід забезпечував можливість просторового порівняння стану екосистем без впливу кліматичних або геохімічних відмінностей. Вміст органічної речовини у ґрунті визначався за ДСТУ 4287:2004 [4] для кожної ділянки за результатами лабораторного аналізу проб.

Відбір ґрунтових проб проводився у фазу максимального сезонного розвитку фауни. Стандартні моноліти розміром 25×25 см і глибиною 10 см відбиралися вручну відповідно до вимог ДСТУ ISO 10381-6:2004 [5] з інтервалом не менше 5 м між точками. На кожній ділянці відбирали по 10 монолітів, що дозволяло охопити мікрогетерогенність ґрунтових умов у межах заданої території. Зібраний матеріал фіксувався в 70% етанолі, після чого проводилася таксономічна обробка в лабораторних умовах. Кількісні та якісні показники фауни усереднювались для кожної ділянки з подальшим розрахунком середніх значень та стандартних відхилень.

Ідентифікацію ґрунтових безхребетних здійснювали до рівня роду або виду за допомогою мікроскопа XS-5520 LED MICRO med із використанням таксономічних визначників, адаптованих до відповідних груп: для Collembola – за спеціалізованим зведенням [18], для Oribatida – за атласом і визначником [20], а також профільним томом серії «Фауна України» [6]. Вибіркове зіставлення окремих таксонів флори та фауни здійсню-



Рис. 1. Географічне розташування досліджуваних пунктів і міжпунктові відстані у межах Волинської області

валосся на основі сучасних джерел, що поєднують морфологічну ідентифікацію та фітоіндикаційні підходи з урахуванням регіонального представництва [1; 3; 7].

Біометричні показники включали чисельність, відносне домінування та видовий склад (S). Для оцінки різноманіття використовувались також індекси Шеннона та Симпсона — у випадках з достатньою таксономічною насиченістю. Усі розрахунки проводились у перерахунку на 1 м². Лабораторна обробка біологічного матеріалу, таксономічна ідентифікація організмів і розрахунків біоіндикаційних показників здійснювались на базі лабораторії «Фауни і систематики безхребетних тварин біоценозів західного Полісся» та лабораторії «Олігохетології» кафедри зоології факультету Біології та лісового господарства Волинського національного університету імені Лесі Українки.

Статистична обробка даних виконувалась у середовищі PAST 4.03. Для перевірки достовірності різниць використовували дисперсійний аналіз (ANOVA), а для встановлення взаємозв'язків між абіотичними показниками та структурою угруповань — кореляційний аналіз за коефіцієнтом Спірмена (ρ). Статистичну значущість визначала межа $p < 0,05$.

Результати. Угруповання ґрунтових безхребетних, сформовані в межах чотирьох типів екосистем, виявили чітку градацію чисельності та видового складу відповідно до ступеня антропогенного навантаження. Природна лісопаркова ділянка демонструвала найбільш стабільну структуру, тоді як техногенна зона характеризувалась спрощенням фауни та зниженням показників різноманіття. Агроекосистема й урбанізоване середовище займали проміжне положення. Отримані кількісні характеристики систематизовано в таблиці 1.

Значення загальної чисельності мезофауни варіювали від 1212 екз./м² на умовно-природній ділянці до 528 екз./м² у техногенній зоні, що свідчить про сильну залежність фауни від стану ґрунтового середовища. Висока щільність у лісопарковій зоні вказує на сприятливі гідротермічні умови, наявність стабільного органічного шару та низький рівень механічних порушень. Навпаки, зменшення чисельності в техногенній зоні пов'язане з високим рівнем хімічного навантаження, ущільненням ґрунту й зниженням вмісту органічної речовини, що обмежує доступну екологічну нішу для більшості таксонів [14; 17]. Високі показники індексів Шеннона ($H' = 2,18$) і Симпсона ($D = 0,87$) у природній ділянці підтверджують складну трофічну та просторову структуру спільноти з рівномірним розподілом чисельності між таксонами. Зниження H' до 1,12 і D до 0,53 у техногенній зоні свідчить про різке спрощення структури угруповання, зростання домінування кількох євритопних груп і втрату регіонально характерного різноманіття [10; 15; 18]. Урбанізована територія (734 екз./м²) та агроекосистема (662 екз./м²) демонстрували проміжні значення, що є наслідком збереження фрагментів природної фауни поряд із формуванням вторинних, толерантних до порушень елементів. Ці показники засвідчують, що інтенсивність антропогенного пресу безпосередньо впливає на склад, функціонування та стійкість ґрунтових біоценозів.

Структура домінування ґрунтових безхребетних на досліджених ділянках виявила суттєві відмінності, що узгоджується з характером трансформації екосистем. Склад угруповань змінювався не лише за чисельністю та кількістю таксонів, а й за співвідношенням домінуючих груп. Аналіз відносної чисельності найбільш

Таблиця 1

Загальні характеристики ґрунтової мезофауни на досліджених ділянках

Ділянка (тип і розташування)	Чисельність (екз./м²)	Кількість таксонів (S)	Індекс Шеннона (H')	Індекс Симпсона (D)
Ботанічний заказник загальнодержавного значення «Воротнів» (умовно-природна)	1212	14	2,18	0,87
Сільськогосподарські угіддя поблизу с. Гірка Полонка (агроєкосистема)	662	10	1,79	0,75
Зелена зона центральної частини м. Луцьк (урбанізована ділянка)	734	9	1,68	0,70
Промислова зона поблизу ПрАТ «Цумань» (техногенна ділянка)	528	7	1,12	0,53

поширених таксонів дозволив виявити типові для кожного середовища профілі домінування, які відображають екологічну стабільність або, навпаки, ступінь порушення ґрунтової системи. У таблиці 2 представлено відносну чисельність (% від загального складу) п'яти основних груп мезофауни, що формують ядро структури угруповань на кожній із досліджених територій. Показники розраховано за допомогою коефіцієнта домінування.

Таксономічна структура угруповань ґрунтових безхребетних відзначалась значною варіативністю між дослідженими ділянками, що зумовлено різною інтенсивністю антропогенного навантаження. В умовно-природній екосистемі переважали представники ряду Oribatida (28 %) та класу Collembola (26 %). Орібатидні кліщі характеризуються низькою толерантністю до порушення ґрунтової структури та високою залежністю від стабільного гідротермічного режиму, що робить їх індикаторами екологічної стабільності. Ентомобрії ж включають як чутливі до порушень форми, так і пластичні види, проте їхня висока частка свідчить про наявність умов, сприятливих для ґрунтової мезофауни з різними адаптивними стратегіями. На агроєкосистемній ділянці домінування зміщується в бік ентомобрій Collembola (33 %) та кліщів Oribatida (30 %), що типово для середовищ із регулярним механічним обробітком, помірним вмістом органічної речовини та підвищеною флуктуацією мікрокліматичних показників, які зберігають сприятливі умови для частини редуцентної мезофауни. Урбанізована територія виявила найбільшу рівномірність у домінуванні між основними групами –

орібатидними кліщами (Oribatida – 27 %), ентомобріями (Collembola – 24 %) та ізоподами (Porcellio – 20 %), що відображає фрагментований характер середовища з мозаїчністю мікробіотопів, де зберігаються локальні осередки фауни з різним ступенем екологічної стійкості [13, с. 842]. Найбільш спрощене угруповання виявлено в техногенній зоні, де понад 70 % усієї фауни формували два доміанти: ентомобрії (Collembola – 43 %) і гамазові кліщі (Gamasina – 31 %), що свідчить про високий рівень екологічного стресу та переважання пластичних, швидко адаптивних форм, здатних до ефективної колонізації нестабільних субстратів [9, с. 62]. Переважання Collembola і Gamasina в техногенній зоні відображає не лише високий адаптивний потенціал цих груп, але й функціональне спрощення ґрунтової екосистеми, в якій редукторні, трофічні та біотурбуючі функції концентруються у вузькому колі неспеціалізованих таксонів з r-стратегією розвитку [11, с. 4–5]. Це зменшує здатність ґрунтових угруповань до регенерації після порушень і послаблює трофічну цілісність біоценозу. Така структура домінування вказує на зміну трофічного профілю та зменшення кількості екологічно спеціалізованих видів у напрямку зростання техногенного пресу.

З метою оцінки впливу абіотичних чинників на структурні параметри мезофауни було проведено кореляційний аналіз між вмістом органічної речовини в ґрунті та чисельністю ґрунтових безхребетних. Встановлено чітку позитивну залежність між цими показниками: зі зростанням вмісту органіки зростала й щільність фауни. Лінійна регресія описується рівнянням $y = 183,99x + 213,62$, з високим коефіцієнтом детермінації

Таблиця 2

Відносна чисельність основних груп ґрунтової мезофауни на досліджених ділянках за коефіцієнтом домінування

Таксон	Ботанічний заказник загальнодержавного значення «Воротнів» (умовно-природна)	Сільськогосподарські угіддя поблизу с. Гірка Полонка (агроєкосистема)	Зелена зона центральної частини м. Луцьк (урбанізована ділянка)	Промислова зона поблизу ПрАТ «Цумань», (техногенна ділянка)
Lumbricidae	21	12	11	7
Collembola	26	33	24	43
Oribatida	28	30	27	14
Porcellio	17	9	20	5
Gamasina	8	16	18	31
	100	100	100	100

($R^2 = 0,952$) та статистично значущим рівнем достовірності ($p = 0,023$). Це підтверджує тісний функціональний зв'язок між трофічною базою ґрунту та кількісною структурою мезофауни.

На рисунку 2 зображено середні значення чисельності безхребетних для кожної з досліджених ділянок залежно від вмісту органічної речовини, з побудовою лінії регресії. Точки позначено відповідними підписами для візуального зіставлення просторового розташування спостережень.

Візуальний аналіз графіка підтверджує, що найвищу чисельність фауни спостерігали на лісопарковій ділянці, яка характеризувалася максимальним вмістом органічної речовини (5,1 %). Водночас найнижча щільність – у техногенній зоні (1,4 % органіки), що узгоджується з екологічним уявленням про деградацію біоценозу внаслідок виснаження гумусного горизонту [19, с. 8]. Агроєкосистема й урбанізована територія продемонстрували проміжні значення як за органікою, так і за чисельністю, що свідчить про часткове збереження

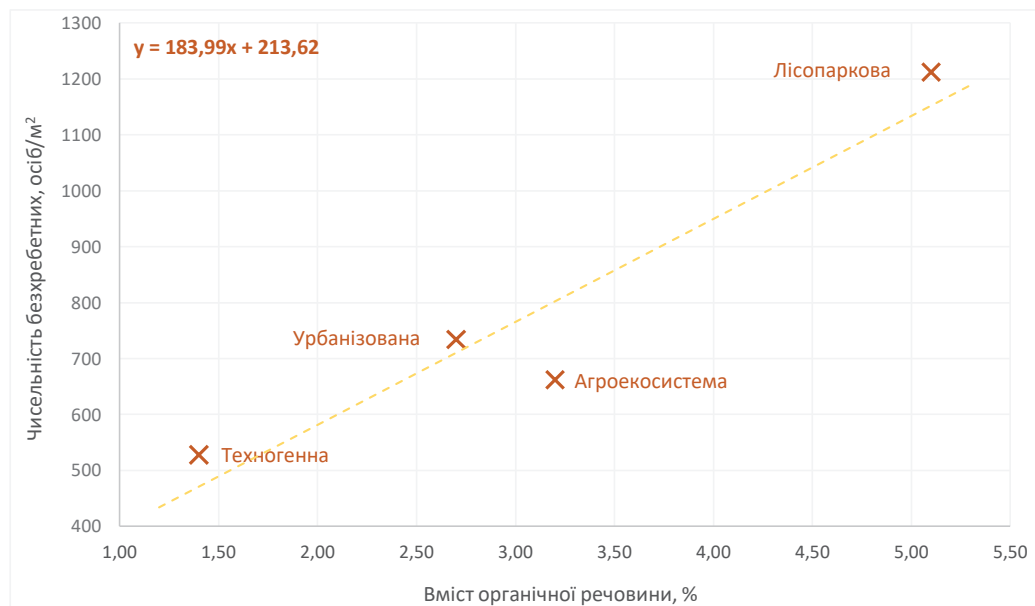


Рис. 2. Залежність чисельності ґрунтових безхребетних від відсоткового вмісту органічної речовини у ґрунті

трофічної бази фауни. Органічна речовина відіграє визначальну роль у формуванні чисельної структури ґрунтових угруповань і може розглядатися як чутливий екологічний предиктор біологічної активності ґрунтів [16, с. 115].

Результати дослідження виявили послідовну трансформацію структури ґрунтових угруповань безхребетних уздовж градієнта антропогенного навантаження [17, с. 176]. Чисельність, видовий склад і індекси різноманіття виявили максимальні значення на умовно-природній ділянці та мінімальні – в техногенній зоні. Домінування окремих евритопних груп і зниження рівномірності в техногенних умовах підтверджують спрощення трофічної структури біоценозу. Виявлена позитивна залежність чисельності мезофауни від вмісту органічної речовини свідчить про ключову роль трофічних ресурсів у підтриманні екологічної стабільності ґрунтів. Загалом, інтеграція кількісних, таксономічних та функціональних параметрів дозволяє розглядати ґрунтову мезофауну як ефективний індикатор екосистемних змін у середовищах з різним рівнем антропогенного впливу.

Висновки. Результати дослідження свідчать про тісний зв'язок між ступенем антропогенного наванта-

ження та біоіндикаційними характеристиками ґрунтових безхребетних. Умовно-природна ділянка характеризувалася найвищими показниками: чисельність мезофауни сягала 1212 екз./м², індекс Шеннона – 2,18, індекс Симпсона – 0,87. Натомість у техногенній зоні ці значення знижувались відповідно до 528 екз./м², 1,12 та 0,53. Встановлено позитивну кореляцію чисельності безхребетних із вмістом органічної речовини ($R^2 = 0,952$), що підкреслює ключову роль трофічного ресурсу у формуванні ґрунтових угруповань. Структура домінування свідчила про зменшення частки спеціалізованих таксонів (Lumbricidae, Porcellio, Oribatida) та переважання толерантних форм (Collembola, Gamasina) за умов забруднення й порушення ґрунтового середовища. Отримані дані узгоджуються з результатами інших досліджень і підтверджують ефективність використання комплексних зоологічних показників як чутливих індикаторів екологічного стану ґрунтів різного типу землекористування. У подальших дослідженнях доцільно розширити спектр моніторингових ділянок, залучити сезонну динаміку та оцінити чутливість мезофауни до інтегрованих факторів забруднення, зокрема у поєднанні хімічного, фізичного та біологічного навантаження.

Література:

1. Горова А.І., Павличенко А.В., Борисовська О.О., Грунтова В.Ю. та ін. Біоіндикація: методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт студентами напряму підготовки 6.040106 «Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування». Дніпро : НГУ, 2014. 76 с.
2. Горова А.І. Методологічні аспекти оцінки генетичних наслідків техногенезу. *Екологія і природокористування*, 2001, вип. 3, с. 143–152.
3. Грицак Л.Р., Барна І.М., Кодлюк І.М., Сельська І.І., Сплавінська Ю.Т., Сукар Х.В., Барна С.С. Біоіндикаційні методи для потреб системного аналізу якості довкілля. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: Географія*, 2017, вип. 2, с. 153–165.
4. ДСТУ 4287:2004. Грунти. Методи лабораторного визначення показників родючості. Київ : Держспоживстандарт України, 2005. 18 с.
5. ДСТУ ISO 10381-6:2004. Якість ґрунту. Відбір зразків. Частина 6. Керівництво з відбору зразків для оцінювання біологічної активності у ґрунті. Київ : Держспоживстандарт України, 2005. 9 с.
6. Єврюжихіна Г.Я. Кліщі-орібатида (Oribatei). Фауна України. Т. 27, вип. 1. Київ : Наук. думка, 1978. 360 с.
7. Притула Н.М. Фіто- та зооіндикація стану навколишнього середовища. Інституційний репозитарій Запорізького національного університету. URL: <https://dspace.znu.edu.ua/jspui/handle/12345/12902> (дата звернення: 18.06.2025).
8. Сметана О.М., Сметана Н.М. Зооіндикація антропогенного навантаження на степові біоценози Криворіжжя. *Еколого-біологічні дослідження: матеріали наук. конф.*, Кривий Ріг, 2002, с. 390–396.
9. Barton P.S., Moir M.L. Invertebrate indicators and ecosystem restoration. In: Lindenmayer D., Barton P. (eds.) *Indicators and surrogates of biodiversity and environmental change*. Amsterdam : Elsevier, 2015, pp. 59–68.
10. Boháč J., Jahnová Z. Land use changes and landscape degradation in central and eastern Europe in the last decades: epigeic invertebrates as bioindicators of landscape changes. In: Kozłowski J. (ed.) *Environmental Indicators*. Dordrecht : Springer, 2015, pp. 395–420. DOI: 10.1007/978-94-017-9499-2_24.
11. Davidson M., Minor M., Todd J. Terrestrial macrofauna invertebrates as indicators of agricultural impacts. AgResearch Ltd., 2024. Available at: https://agresearch.figshare.com/articles/report/Terrestrial_macrofauna_invertebrates_as_indicators_of_agricultural_impacts/26001967?file=46945099
12. Fontanetti C.S., Nogarol L.R., Souza R.D., Perez D.G., Maziviero G.T. Bioindicators and biomarkers in the assessment of soil toxicity. In: Villalobos M. (Ed.), *Soil Contamination*. InTech, 2011, pp. 143–168. DOI: 10.5772/25042.
13. Gerlach J., Samways M., Pryke J. Terrestrial invertebrates as bioindicators: an overview of available taxonomic groups. *Journal of Insect Conservation*, 2013, vol. 17, pp. 831–850. DOI: 10.1007/s10841-013-9565-9.
14. Ghannem S., Bacha O., Fkiri S., Kanzari S., Aydi A., Touaylia S. Soil and sediment organisms as bioindicators of pollution. *Ecologies*, 2024, vol. 5, no. 4, pp. 679–696. DOI: 10.3390/ecologies5040040.
15. Manu M. Soil invertebrates – a useful tool in biomonitoring of heavy metal pollution: a review. *Studia Universitatis Vasile Goldis. Seria Stiintele Vietii (Life Sciences Series)*, 2017, 27(4), pp. 247–258.
16. Medhi J., Dutta J., Kalita M.C. Biomonitoring ecosystem: modelling relationship with environmental factors. In: Das S., Ray S. (Eds.), *Arthropods: Are they beneficial for mankind?* Singapore: Springer, 2021, pp. 113–130.
17. Paoletti M.G. *Invertebrate biodiversity as bioindicators of sustainable landscapes: Practical use of invertebrates to assess sustainable land use*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2012. 460 p.
18. Potapov M.A. *Synopses on Palaearctic Collembola: Volume 3. Isotomidae*. Warszawa: Museum and Institute of Zoology, Polish Academy of Sciences, 2001. 603 p.
19. Santorufu L., Van Gestel C.A., Rocco A., Maisto G. Soil invertebrates as bioindicators of urban soil quality. *Environmental Pollution*, 2012, vol. 161, pp. 57–63. DOI: 10.1016/j.envpol.2011.09.042.
20. Weigmann G. *Hornmilben (Oribatida)*. In: Dahl F. (Ed.), *Die Tierwelt Deutschlands*, vol. 76. Jena: G. Fischer, 2006. 520 p.
21. Zaghloul A., Saber M., Gadow S., Awad F. Biological indicators for pollution detection in terrestrial and aquatic ecosystems. *Bulletin of the National Research Centre*, 2020, vol. 44, no. 1, pp. 1–11. DOI: 10.1186/S42269-020-00385-X.

References:

1. Horova A.I., Pavlychenko A.V., Borysovska O.O., Hrunтова V.Yu. та ін. (2014). Bioindykatsiia: metodychni rekomendatsii do vykonannya laboratornykh robot studentamy napriamu pidhotovky 6.040106 «Ekolohiia, okhrona navkolyshnoho seredovyshcha ta zbalansovane pryrodokorystuvannya» [Bioindication: methodological guidelines for laboratory work of students majoring in 6.040106 "Ecology, environmental protection and sustainable use of natural resources"]. Dnipro: NHU. 76 p. [in Ukrainian].
2. Horova A.I. (2001). Metodolohichni aspekty otsinky henetychnykh naslidkiv tekhnogenezu [Methodological aspects of assessing genetic consequences of technogenesis]. *Ekolohiia i pryrodokorystuvannya*, (3), 143–152. [in Ukrainian].
3. Hrytsak L.R., Barna I.M., Kodliuk I.M., Selska I.I., Splavinska Yu.T., Sukar Kh.V., Barna S.S. (2017). Bioindykatsiini metody dlia potreb systemnoho analizu yakosti dovkillia [Bioindication methods for systemic analysis of environmental quality]. *Naukovi zapysky Ternopilskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Serii: Heohrafiia*, (2), 153–165. [in Ukrainian].
4. DSTU 4287:2004. (2005). Hrunt. Metody laboratornoho vyznachennia pokaznykiv rodiuchosti [Soil. Methods of laboratory determination of fertility indicators]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy. 18 p. [in Ukrainian].
5. DSTU ISO 10381-6:2004. (2005). Yakist hruntu. Vidbir zrazkiv. Chastyna 6. Kerivnytstvo z vidboru zrazkiv dlia otsiniuvannya biolohichnoi aktyvnosti u hrunti [Soil quality. Sampling. Part 6. Guidance on the collection of samples to assess biological activity in soil]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy. 9 p. [in Ukrainian].

6. Yevryuzhykhina H.Ya. Mites-Oribatids (Oribatei). Fauna of Ukraine. Vol. 27, Issue 1. Kyiv: Naukova Dumka, 1978. 360 p. [in Ukrainian].
7. Prytula N.M. (n.d.). Fito- ta zooindykatsiia stanu navkolyshnoho seredovyscha [Phyto- and zooindication of the state of the environment]. *Instytutsiinyi repozytarii Zaporizkoho natsionalnoho universytetu*. URL: <https://dspace.znu.edu.ua/jspui/handle/12345/12902> (date of access: 18.06.2025). [in Ukrainian].
8. Smetana O.M., Smetana N.M. (2002). Zooindykatsiia antropohennoho navantazhennia na stepovi biotsenozy Kryvorizhzhia [Zooindication of anthropogenic load on steppe biocenoses of Kryvorizhzhia]. *Ekoloho-biolohichni doslidzhennia: materialy nauk. konf.*, Kryvyi Rih, 390–396. [in Ukrainian].
9. Barton P.S., Moir M.L. Invertebrate indicators and ecosystem restoration. In: Lindenmayer D., Barton P. (eds.) *Indicators and surrogates of biodiversity and environmental change*. Amsterdam : Elsevier, 2015, pp. 59–68.
10. Boháč J., Jahnová Z. Land use changes and landscape degradation in central and eastern Europe in the last decades: epigeic invertebrates as bioindicators of landscape changes. In: Kozłowski J. (ed.) *Environmental Indicators*. Dordrecht : Springer, 2015, pp. 395–420. DOI: 10.1007/978-94-017-9499-2_24.
11. Davidson M., Minor M., Todd J. Terrestrial macrofauna invertebrates as indicators of agricultural impacts. AgResearch Ltd., 2024. Available at: https://agresearch.figshare.com/articles/report/Terrestrial_macrofauna_invertebrates_as_indicators_of_agricultural_impacts/26001967?file=46945099
12. Fontanetti C.S., Nogarol L.R., Souza R.D., Perez D.G., Maziviero G.T. Bioindicators and biomarkers in the assessment of soil toxicity. In: Villalobos M. (Ed.), *Soil Contamination*. InTech, 2011, pp. 143–168. DOI: 10.5772/25042.
13. Gerlach J., Samways M., Pryke J. Terrestrial invertebrates as bioindicators: an overview of available taxonomic groups. *Journal of Insect Conservation*, 2013, vol. 17, pp. 831–850. DOI: 10.1007/s10841-013-9565-9.
14. Ghannem S., Bacha O., Fkiri S., Kanzari S., Aydi A., Touaylia S. Soil and sediment organisms as bioindicators of pollution. *Ecologies*, 2024, vol. 5, no. 4, pp. 679–696. DOI: 10.3390/ecologies5040040.
15. Manu M. Soil invertebrates – a useful tool in biomonitoring of heavy metal pollution: a review. *Studia Universitatis Vasile Goldis. Seria Stiintele Vietii (Life Sciences Series)*, 2017, 27(4), pp. 247–258.
16. Medhi J., Dutta J., Kalita M.C. Biomonitoring ecosystem: modelling relationship with environmental factors. In: Das S., Ray S. (Eds.), *Arthropods: Are they beneficial for mankind?* Singapore: Springer, 2021, pp. 113–130.
17. Paoletti M.G. *Invertebrate biodiversity as bioindicators of sustainable landscapes: Practical use of invertebrates to assess sustainable land use*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2012. 460 p.
18. Potapov M.A. *Synopses on Palaearctic Collembola: Volume 3. Isotomidae*. Warszawa: Museum and Institute of Zoology, Polish Academy of Sciences, 2001. 603 p.
19. Santorufo L., Van Gestel C.A., Rocco A., Maisto G. Soil invertebrates as bioindicators of urban soil quality. *Environmental Pollution*, 2012, vol. 161, pp. 57–63. DOI: 10.1016/j.envpol.2011.09.042.
20. Weigmann G. *Hornmilben (Oribatida)*. In: Dahl F. (Ed.), *Die Tierwelt Deutschlands*, vol. 76. Jena: G. Fischer, 2006. 520 p.
21. Zaghoul A., Saber M., Gadow S., Awad F. Biological indicators for pollution detection in terrestrial and aquatic ecosystems. *Bulletin of the National Research Centre*, 2020, vol. 44, no. 1, pp. 1–11. DOI: 10.1186/S42269-020-00385-X.

Дата першого надходження рукопису до видання: 22.08.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 24.09.2025

Дата публікації: 31.10.2025