

## БІОМОНІТОРИНГ ПРИРОДНИХ І АНТРОПОГЕННИХ ЕКОСИСТЕМ ВОЛИНО-ПОДІЛЛЯ ЗА УЧАСТЮ ҐРУНТОВИХ ТВАРИН

Бусленко Л.В., Теплюк В.С.

Волинський національний університет імені Лесі Українки  
пр. Волі, 13, 43025, м. Луцьк

[lesybuslenko@gmail.com](mailto:lesybuslenko@gmail.com), [tepluk.vadym@vnu.edu.ua](mailto:tepluk.vadym@vnu.edu.ua)

Інтенсивне землекористування та урбанізація у Волино-Поділлі спричиняють значні трансформації ґрунтового середовища, що призводить до зменшення біорізноманіття безхребетних та змін у функціонуванні екосистем. Ґрунтові тварини, включно з мезо- та макрофауною, відіграють ключову роль у розкладанні органічної речовини, кругообігу поживних речовин та депонуванні вуглецю, тому їхня чисельність, різноманіття та структура угруповань є надійними показниками екологічного стану та стійкості різних біотопів. Метою цього дослідження є оцінка структури, чисельності та індикаторну функцію угруповань ґрунтової фауни у природних екосистемах, таких як ліси та луки, а також у трансформованих антропогенним шляхом екосистемах, зокрема агроугіддях та урбанізованих територіях.

У дослідженні застосовували поєднання польових та лабораторних методів, включно з відбором ґрунтових монолітів, пастками Барбера та стандартизованими методами екстракції Enchytraeidae, всього було опрацьовано 123 зразки. У природних екосистемах середня щільність ґрунтових тварин досягала 1725 инд./м², біомаса становила 13,5 г/м², кількість видів – 25, а індекс Шеннона – 2,7. У трансформованих антропогенно екосистемах ці показники були значно нижчими: середня щільність – 850 инд./м², біомаса – 6,4 г/м², кількість видів – 10,5, а  $H' = 2,0$ . Природні біотопи характеризувалися угрупованнями з кількох рівнозначних таксонів, таких як Collembola, Acari та Lumbricidae, тоді як у агроугіддях та міських територіях структура була спрощеною, з домінуванням небагатьох груп, переважно Enchytraeidae та Isopoda.

Отримані результати свідчать, що угруповання ґрунтової фауни є чутливими індикаторами антропогенного впливу та можуть надавати важливу інформацію для оцінки стабільності екосистем і якості довкілля. Дослідження також підкреслює значення інтеграції біоіндикаторних показників у системи регіонального моніторингу та пропонує подальші дослідження для визначення внеску окремих таксонів у депонування органічного вуглецю, а також для розробки комплексних стратегій біомоніторингу для сталого землекористування та збереження біорізноманіття у Волино-Поділлі. *Ключові слова:* Волино-Поділля, ґрунтові тварини, біомоніторинг, природні екосистеми, антропогенні екосистеми, індекс Шеннона, біоіндикація, вуглецевий баланс.

**Biomonitoring of natural and anthropogenic ecosystems of Volyn-Podillia with the participation of soil animals. Buslenko L., Tepluk V.**

Intensive land use and urbanization in the Volyn-Podillia region cause substantial transformations in the soil environment, leading to a reduction in invertebrate biodiversity and alterations in ecosystem functioning. Soil animals, including meso- and macrofauna, play a key role in organic matter decomposition, nutrient cycling, and carbon deposition, making their abundance, diversity, and community composition reliable indicators of the ecological state and resilience of different habitats. This study aimed to assess the structure, abundance, and indicator function of soil fauna communities in natural ecosystems such as forests and meadows, as well as in human-modified ecosystems including agricultural lands and urbanized areas.

The research employed a combination of field and laboratory techniques, including soil monolith sampling, barber traps, and standardized extraction methods for enchytraeids, resulting in a total of 123 analysed samples. In natural ecosystems, the mean density of soil animals reached 1725 ind./m², with a biomass of 13.5 g/m², species richness of 25, and a Shannon diversity index of 2.7. In anthropogenically transformed ecosystems, these values were substantially lower, with a mean density of 850 ind./m², biomass of 6.4 g/m², 10.5 species per sample, and  $H' = 2.0$ . Natural habitats were characterized by communities with several equally abundant taxa, such as Collembola, Acari, and Lumbricidae, whereas agricultural and urban areas showed a simplified structure dominated by a few groups, primarily Enchytraeidae and Isopoda.

The findings highlight that soil fauna communities are sensitive indicators of anthropogenic impact and can provide crucial information for assessing ecosystem stability and environmental quality. The study also emphasizes the importance of incorporating bioindicator data into regional monitoring frameworks and suggests further research to quantify the contribution of specific taxa to carbon deposition, as well as to develop comprehensive biomonitoring strategies for sustainable land management and biodiversity conservation in the Volyn-Podillia region. *Key words:* Volyn-Podillia, soil animals, biomonitoring, natural ecosystems, anthropogenic ecosystems, Shannon index, bioindication, carbon balance.

**Постановка проблеми.** Ґрунтові тварини формують важливу складову екосистем, оскільки беруть участь у розкладі органічних решток, кругообігу

поживних речовин, утворенні ґрунтової структури та підтриманні її родючості. Ці організми реагують на зміни у середовищі, тому їхні угруповання засто-

совують як індикатори трансформацій у природних і антропогенних екосистемах. Для Волино-Поділля, де поєднуються ділянки з відносно збереженими природними ландшафтами та території з інтенсивним землекористуванням (сільське господарство, лісгосподарська діяльність, урбанізація), аналіз складу та структури ґрунтової фауни дозволяє простежити ступінь екологічних змін. У низці досліджень [1–3] розглянуто загальні закономірності формування та функціонування ґрунтових угруповань, однак для умов Волино-Поділля регіональні особливості біомоніторингу досліджені обмежено. Недостатньо вивченими залишаються просторові відмінності у складі мезо- та макрофауни між природними і трансформованими екосистемами, а також вплив землекористування, сільськогосподарських практик та лісових дистурбансів на функціонування ґрунтових тварин [4].

Дослідження угруповань ґрунтової мезо- та макрофауни як індикаторів стану ґрунтового середовища створює можливість отримати об'єктивні дані про біорізноманіття та оцінити стійкість ландшафтів Волино-Поділля.

**Актуальність дослідження.** Зміни клімату та антропогенні дистурбанси (посухи, ерозійні процеси, інтенсивне землекористування, урбанізація) безпосередньо впливають на стан ґрунтових екосистем. Для об'єктивної оцінки цих впливів необхідно аналізувати угруповання ґрунтових тварин, які відображають рівень стабільності природних і трансформованих систем. Ґрунтова фауна бере участь у розкладі органічної речовини, регуляції кругообігу вуглецю та поживних елементів, що визначає хід основних процесів у ґрунтовому середовищі. Для Волино-Поділля, де поєднуються ділянки з відносно збереженими екосистемами та території з інтенсивним антропогенним використанням, вивчення складу й структури ґрунтових угруповань дозволяє встановити взаємозв'язок між режимом землекористування, кліматичними коливаннями та станом екологічних процесів.

Аналіз біорізноманіття і ролі ґрунтових тварин дає змогу оцінити рівень стійкості екосистем Волино-Поділля та окреслити напрями їхнього відновлення після зовнішніх впливів.

**Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.** Дослідження виконано в межах наукового напрямку, присвяченого біомоніторингу природних і антропогенних екосистем з використанням ґрунтових тварин. Робота спрямована на вирішення завдань, що стосуються визначення індикаторів стану ґрунтового середовища, аналізу впливу землекористування та кліматичних змін на угруповання ґрунтової фауни, а також розроблення підходів до збереження біорізноманіття в умовах антропогенного навантаження. Результати можуть застосовуватись у практиці природоохоронного планування та при розробленні

стратегій раціонального використання земельних ресурсів Волино-Поділля.

Метою даного дослідження є з'ясування складу та розподілу угруповань ґрунтових тварин у природних і антропогенних екосистемах Волино-Поділля залежно від типу землекористування та інтенсивності антропогенного навантаження, а також визначення можливостей їх використання як індикаторів для оцінки стану й стійкості екосистем.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У звіті FAO, ITPS, GSBI, SCBD and EC [1] систематизовано сучасні знання про ґрунтове біорізноманіття та окреслено виклики для його збереження, підкреслюючи потребу уніфікованих методів біомоніторингу. Schön N. L., et al. [2] запропонували багатофункціональну класифікацію ґрунтових консументів від протистів до хребетних, що дозволяє більш комплексно аналізувати трофічні зв'язки. У іншій роботі Du Preez G., et al. [3] розробили єдину методичну основу для глобального моніторингу ґрунтових тварин, яка забезпечує порівнюваність результатів у різних біомах. Стандарт DIN EN ISO 23611-3 [4] регламентує процедури відбору та екстракції енхітреїд, що є базовим орієнтиром для лабораторних та польових робіт. У дослідженні Panagos P. et al. [5] обґрунтовано необхідність ухвалення Закону про моніторинг ґрунтів у ЄС, що визначає ключові індикатори та параметри їхнього контролю.

Сучасні молекулярні підходи значно розширили можливості біомоніторингу. Так, Xing K. et al. [6] застосували еДНК-аналіз для оцінки змін багаторівневого біорізноманіття в агроекосистемах. Steinke D. et al. [7] довели ефективність метабаркодингу членистоногих для виявлення видового складу та побудови екологічних мереж. Дослідження Köninger J. et al. [8] показало, що тип екосистеми є визначальним чинником формування складу та різноманіття ґрунтових еукаріотів у масштабах Європи. У сфері екотоксикології Swart E. et al. [9] здійснили метаналіз ген-експресійних біомаркерів у ґрунтових безхребетних і вказали на необхідність їхньої перевірки для широкого застосування в моніторингових дослідженнях. Узагальнюючий огляд Beaumelle L. et al. [10] систематизував вплив хімічних стресорів на ґрунтову фауну та окреслив напрями для майбутніх досліджень. В українському науковому контексті Гамкало З., Шпаківська І., Марискевич О. [11] розглянули особливості С-протекторної здатності ґрунтів Полісся, що безпосередньо пов'язано з процесами трансформації органічної речовини. Канарський Ю. та ін. [12] підготували рекомендації зі збереження біорізноманіття та рідкісних оселищ в умовах кліматичних змін, наголосивши на важливості інтеграції біомоніторингових даних у природоохоронну практику.

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** Територія Волино-Поділля поєд-

нує природні ландшафти та ділянки з інтенсивним антропогенним використанням, що створює умови для порівняльного аналізу стану ґрунтових угруповань. Проведення таких досліджень у сільсько-господарських угіддях чи на територіях із високим господарським навантаженням ускладнюється меліоративними роботами, застосуванням агрохімікатів і механічним обробітком ґрунту, які змінюють склад і чисельність безхребетних. На природоохоронних територіях, де господарська діяльність обмежена або заборонена, формуються більш стабільні угруповання ґрунтової фауни, що можуть використовуватися для визначення базових параметрів біорізноманіття. Ґрунтові тварини беруть участь у трансформації органічної речовини та створюють мікросередовища для розвитку мікроорганізмів. Швидкість і напрям цих процесів залежать від гідротопних умов та інтенсивності землекористування. Проте дані про вплив різних режимів господарського використання на структуру угруповань у Волино-Поділлі залишаються фрагментарними.

Глобальні кліматичні зміни впливають на процеси накопичення та мінералізації органічного вуглецю. Відомо, що ґрунтові тварини відіграють ключову роль у його депонуванні та вивільненні, проте кількісні оцінки цих процесів для екосистем регіону є обмеженими. Також бракує порівняльних досліджень, які б дозволили зіставити індикаторну роль ґрунтової фауни у природних та антропогенно трансформованих екосистемах.

**Новизна.** Вперше для території Волино-Поділля здійснено комплексне порівняльне дослідження складу, чисельності та різноманіття ґрунтових мезо- і макрофауністичних угруповань у природних (лісових та лучних) і антропогенно трансформованих (агроугіддях, урбанізованих землях) екосистемах із використанням уніфікованих методів біомоніторингу. У роботі отримано нові кількісні дані щодо просторового розподілу основних таксонів ґрунтових тварин (*Collembola*, *Acari*, *Lumbricidae*, *Enchytraeidae*, *Isopoda*) та їхніх біоіндикаторних характеристик. Виявлено закономірності зміни структури та функціональної організації ґрунтових угруповань залежно від типу землекористування та рівня антропогенного навантаження. Також встановлено регіональні порогові значення біоіндикаторних показників (щільності, біомаси, індексу Шеннона) для оцінки стану та стійкості ґрунтових екосистем Волино-Поділля. Отримані результати поглиблюють знання про механізми реакції ґрунтової фауни на дистурбанси і формують наукове підґрунтя для створення регіональної системи біомоніторингу.

**Методологічне або загальнонаукове значення.** Робота розвиває концепцію використання ґрунтових тварин як інтегральних біоіндикаторів стану екосистем, що поєднує морфологічні, таксономічні та кількісні підходи у вивченні мезо- та макрофауни. Запропонована методика відбору й аналізу проб

ґрунтової фауни (моноліти, пастки Барбера, екстракція *Enchytraeidae*) є адаптованою до природно-кліматичних умов Волино-Поділля і може бути використана як стандартна схема для подібних екологічних досліджень у регіонах із різним рівнем антропогенного впливу. Застосування кількісних показників (щільність, біомаса, видовий склад,  $H'$ ) у поєднанні з біотопічним аналізом дозволяє комплексно оцінювати екологічну стійкість ландшафтів та відстежувати деградаційні процеси у ґрунтовому середовищі. Розроблений підхід має міждисциплінарне значення для ґрунтознавства, екології, агроекології та природоохоронного планування, сприяючи формуванню науково обґрунтованої бази для управління земельними ресурсами й моніторингу стану біорізноманіття.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження проводилися на ділянках природних і антропогенних екосистем Волино-Поділля. Природні території були представлені листяними лісами та лучними угіддями, де ґрунтовий покрив зберігався у відносно стабільному стані. Антропогенно змінені ділянки включали ріллу з інтенсивним землеробським використанням, меліоративні масиви та міські зелені зони. Такий добір ділянок дав змогу порівняти стан угруповань ґрунтових тварин у різних умовах землекористування.

Відбір матеріалу здійснювався за допомогою ґрунтових монолітів ( $25 \times 25$  см, глибина 10 см) та пасток Барбера, встановлених серіями по 10 одиниць на кожній ділянці. Усього було закладено 8 пробних площ: 4 на природних територіях і 4 на антропогенно трансформованих. За стандартною процедурою екстракції отримано 123 зразки ґрунтової мезофауни та макрофауни [1].

У природних екосистемах щільність ґрунтових безхребетних у верхньому горизонті (0–10 см) становила в середньому  $1850 \pm 75$  екз./м<sup>2</sup>, тоді як на орних землях цей показник знижувався майже вдвічі – до  $920 \pm 60$  екз./м<sup>2</sup>. Біомаса тварин у природних умовах сягала 14,3 г/м<sup>2</sup>, а на антропогенних ділянках зменшувалася до 6,8 г/м<sup>2</sup>. Найвищі значення видового різноманіття за індексом Шеннона ( $H' = 2,85$ ) зафіксовано у лісових біотопах, тоді як на урбанізованих територіях індекс не перевищував 1,9.

Особливу увагу приділено енхітреїдам, чисельність яких у природних луках становила  $420 \pm 30$  екз./м<sup>2</sup>, тоді як у ріллі показник знижувався до  $110 \pm 20$  екз./м<sup>2</sup>. КолеMBOLи були представлені 12 видами у лісах і лише 5 видами на агроугіддях. Ці відмінності демонструють чутливість ґрунтових тварин до рівня антропогенного навантаження й підтверджують їхню придатність для біоіндикації.

Отримані результати в таблиці 1 свідчать про чітку різницю між природними та антропогенними екосистемами Волино-Поділля за основними біоіндикаторними показниками. У лісових ділянках щільність ґрунтових тварин становила 1850 екз./м<sup>2</sup>, що є найвищим серед досліджених біотопів. Подібні зна-

чення фіксувалися й на лучних угіддях (1600 екз./м<sup>2</sup>), тоді як на агроугіддях та урбанізованих територіях показники знижувалися майже удвічі – до 920 та 780 екз./м<sup>2</sup> відповідно. Це відображає негативний вплив обробітку ґрунту, агрохімікатів і рекреаційного навантаження на стабільність безхребетних угруповань. Біомаса також суттєво варіювала: у лісах вона становила 14,3 г/м<sup>2</sup>, на луках – 12,7 г/м<sup>2</sup>, тоді як у ріллі та міських екосистемах знижувалася до 6,8 та 5,9 г/м<sup>2</sup>. Таким чином, природні території утримують удвічі більший запас ґрунтової зоомаси порівняно з антропогенними. Видове різноманіття чітко відображає рівень антропогенного навантаження. У лісових угрупованнях зафіксовано 28 видів ґрунтових тварин з індексом Шеннона  $H' = 2,85$ , тоді як в урбанізованих умовах – лише 9 видів та  $H' = 1,9$ . Подібна тенденція простежується і для колембол: 12 видів у лісах, 10 у луках, проти 5 на агроугіддях і лише 4 у міських біотопах. Енхітреїди виявилися чутливими індикаторами: їх чисельність на луках сягала 420 екз./м<sup>2</sup>, у лісах – 380 екз./м<sup>2</sup>, тоді як у ріллі та урбанізованих ділянках вона знижувалася до 110 та 95 екз./м<sup>2</sup>. Це підтверджує їхню придатність для оцінки деградаційних процесів у ґрунтах. Загалом, дані демонструють стабільність і високу продуктивність природних екосистем порівняно з трансформованими.

Аналіз угруповань ґрунтової фауни у природних та антропогенних екосистемах Волино-Поділля показав суттєві відмінності як у видовому складі, так і в таксономічній структурі. У лісових біотопах було зафіксовано 28 видів безхребетних, серед яких найбільшу частку становили колемболи (Collembola) та кліщі (Acari), що разом формували понад 45 % чисельності. Значну роль відігравали також енхітреїди (Enchytraeidae), які забезпечували стабільність процесів мінералізації органічної речовини. У лучних ділянках виявлено 22 види, із них переважали дощові черви (Lumbricidae) та колемболи, тоді як частка кліщів була дещо нижчою, ніж у лісах [2].

На агроугіддях видовий склад обмежувався 12 видами, серед яких домінували енхітреїди та окремі представники жуків-жуличей (Carabidae). Проте їхня чисельність була значно меншою, ніж у природних біотопах. Урбанізовані території вияви-

лися найбільш збідненими: тут зафіксовано лише 9 видів, серед яких переважали ізоподи (Isopoda) та окремі види колембол, тоді як популяції люмбрицид і енхітреїд були майже повністю редуковані.

Кількісні показники підтвердили цю тенденцію. У лісових екосистемах середня щільність мезо- та макрофауни досягала 1850 екз./м<sup>2</sup> при біомасі 14,3 г/м<sup>2</sup>. Для луків відповідні значення становили 1600 екз./м<sup>2</sup> та 12,7 г/м<sup>2</sup>. В агроугіддях щільність знижувалася до 920 екз./м<sup>2</sup> (6,8 г/м<sup>2</sup>), а на урбанізованих територіях – до 780 екз./м<sup>2</sup> (5,9 г/м<sup>2</sup>). Таким чином, природні угруповання зберігають удвічі вищі значення чисельності й біомаси порівняно з трансформованими. Домінування окремих таксонів також варіювало між біотопами. Якщо у природних екосистемах угруповання були збалансованими з кількома домінуючими групами (колемболи, кліщі, люмбрициди), то в антропогенних простежувалася спрощена структура з перевагою небагатьох видів. Це свідчить про деградацію трофічних ланцюгів і зниження екологічної стійкості систем із високим рівнем антропогенного впливу.

Рисунок 1 наочно відображає перехід від поліструктурних угруповань у природних екосистемах до спрощених систем у трансформованих, що є ознакою втрати екологічної стійкості. Порівняльна структура угруповань свідчить, що у природних екосистемах (ліси та луки) домінування ґрунтових тварин розподілене між кількома таксономічними групами, що формує більш збалансовану систему. Тут жодна група не займає абсолютного переважання, що свідчить про функціональну рівновагу між редуцентами, консументами та мікропаразитами. В агроугіддях структура має ознаки спрощення: різко зростає частка енхітреїд, тоді як більшість інших груп втрачають позиції. Така диспропорція вказує на зниження трофічного різноманіття й спрощення екологічних зв'язків. Найбільш однобічна картина зафіксована на урбанізованих територіях. Тут значну частку формують ізоподи та поодинокі види колембол, тоді як інші групи представлені в мінімальній кількості. Це демонструє тенденцію до заміщення складних природних угруповань кількома толерантними видами, здатними витримувати інтенсивне антропогенне навантаження.

Таблиця 1

**Біоіндикаторні показники угруповань ґрунтових тварин у природних та антропогенних екосистемах Волино-Поділля**

| Тип екосистеми         | Щільність, екз./м <sup>2</sup> | Біомаса, г/м <sup>2</sup> | Кількість видів | Індекс Шеннона (H') | Чисельність енхітреїд, екз./м <sup>2</sup> | Кількість видів колембол |
|------------------------|--------------------------------|---------------------------|-----------------|---------------------|--------------------------------------------|--------------------------|
| Лісові ділянки         | 1850                           | 14,3                      | 28              | 2,85                | 380                                        | 12                       |
| Лучні ділянки          | 1600                           | 12,7                      | 22              | 2,6                 | 420                                        | 10                       |
| Агроугіддя             | 920                            | 6,8                       | 12              | 2,05                | 110                                        | 5                        |
| Урбанізовані території | 780                            | 5,9                       | 9               | 1,9                 | 95                                         | 4                        |

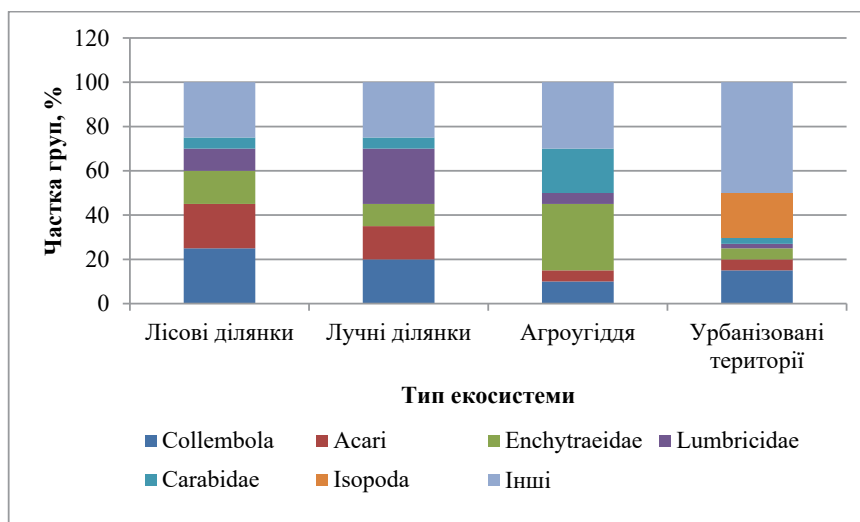


Рис. 1. Порівняльна структура угруповань ґрунтових тварин у природних та антропогенних екосистемах Волино-Поділля

Землекористування і урбанізація призвели до суттєвого спрощення структури ґрунтових угруповань. На орних землях зниження чисельності дощових черв'яків та колембол супроводжується зростанням частки енхітреїд, що є характерною реакцією на механічний обробіток і застосування агрохімікатів. Подібне домінування окремої групи відображає зменшення трофічної різноманітності та перерозподіл функціонального навантаження у системі. Урбанізовані ділянки відзначаються ще більшою редукцією таксонів: збережені лише кілька толерантних видів, здатних витримувати ущільнення ґрунту, забруднення та коливання вологості [3].

Наслідком цих змін є порушення екосистемних функцій. У природних лісах і луках ґрунтові тварини забезпечують рівномірний розклад органічної речовини, підтримують структуру ґрунту й сприяють формуванню стійких мікробних угруповань. У трансформованих екосистемах втрата видового різноманіття призводить до зменшення швидкості мінералізації та нерівномірного кругообігу поживних речовин. Це особливо помітно у зниженні ролі люмбрицидів, які у природних умовах відповідають за перемішування ґрунту й формування гумусових горизонтів.

Функціональне значення ґрунтових безхребетних простежується і в регуляції вуглецевого балансу. У лісових і лучних екосистемах різні трофічні групи підтримують стабільний процес депонування вуглецю за рахунок рівномірного розкладу органічної речовини та її включення у ґрунтовий профіль. В агроугіддях і урбанізованих територіях ці процеси послаблені, що збільшує ризик вивільнення вуглекислого газу та знижує здатність ґрунту функціонувати як довгострокове сховище органічного вуглецю.

Узагальнені результати таблиці 2 демонструють суттєві відмінності між природними та трансформованими екосистемами Волино-Поділля за всіма інте-

гральними показниками. Середня щільність угруповань у природних біотопах становила 1725 екз./м<sup>2</sup>, що удвічі перевищує показник трансформованих територій (850 екз./м<sup>2</sup>). Аналогічна тенденція простежується й за біомасою: у природних екосистемах вона дорівнювала 13,5 г/м<sup>2</sup>, тоді як в антропогенних – лише 6,4 г/м<sup>2</sup>. Видове різноманіття також різко знижується під дією антропогенного навантаження. Якщо в лісах та на луках фіксувалося в середньому 25 видів ґрунтових тварин, то в агроугіддях і урбанізованих зонах – лише 10,5 виду. Це підтверджується значенням індексу Шеннона: у природних умовах він становив 2,7, що свідчить про більш рівномірний розподіл особин між видами, тоді як у трансформованих він знижувався до 2,0. Частка домінуючих груп у природних екосистемах обмежувалася 45 %, що вказує на збалансовану структуру з кількома рівнозначними таксонами. У трансформованих біотопах цей показник зростав до 65 %, що є свідченням різкого переважання небагатьох видів та спрощення трофічної структури. Дані інтегральних показників підтверджують, що антропогенне втручання знижує не лише чисельність і біомасу ґрунтових тварин, а й призводить до втрати різноманіття та посилення домінування окремих груп, що знижує екологічну стійкість екосистем.

**Головні висновки.** Результати дослідження показують, що склад і структура угруповань ґрунтових тварин Волино-Поділля різняться між природними та трансформованими екосистемами. У лісах і на луках зберігаються вищі показники щільності, біомаси та видового різноманіття, що характеризується більш рівномірним розподілом трофічних груп. В агроугіддях та урбанізованих територіях ці показники знижуються майже удвічі, домінування зосереджується в кількох таксонах, а структура угруповань спрощується. Отримані дані підтверджують при-

**Інтегральні біоіндикаторні показники ґрунтових тварин  
у природних і трансформованих екосистемах**

| Група екосистем                           | Середня щільність, екз./м <sup>2</sup> | Середня біомаса, г/м <sup>2</sup> | Середня кількість видів | Середній індекс Шеннона (H') | Частка домінуючих груп, % |
|-------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|------------------------------|---------------------------|
| Природні (ліси, луки)                     | 1725                                   | 13,5                              | 25                      | 2,7                          | 45                        |
| Трансформовані (агроугіддя, урбанізовані) | 850                                    | 6,4                               | 10,5                    | 2                            | 65                        |

датність ґрунтових тварин як індикаторів стану екосистем та рівня антропогенного впливу. Зменшення їхнього різноманіття й біомаси відображає деградацію ґрунтового середовища та зниження його здатності до депонування вуглецю і підтримання родючості. Біоіндикаторні підходи на основі ґрунтової фауни дають змогу оцінювати стан екосистем і прогнозувати зміни їхньої стійкості під впливом кліматичних та антропогенних чинників.

**Перспективи використання результатів дослідження.** Перспективним напрямом продовження

роботи є порівняння функціональної ролі ґрунтових тварин у природних і трансформованих екосистемах з урахуванням просторово-часових змін кліматичних факторів. Подальші дослідження можуть бути зосереджені на визначенні внеску окремих таксономічних груп у процеси депонування органічного вуглецю та відновлення родючості ґрунтів після антропогенного навантаження. Важливим завданням є також інтеграція біоіндикаторних показників у системи екологічного моніторингу регіону для прогнозування стійкості ландшафтів Волино-Поділля.

**Література**

1. FAO, ITPS, GSBI, SCBD and EC. State of knowledge of soil biodiversity: Status, challenges and potentialities. Rome: FAO, 2020. 618 p. DOI: <https://doi.org/10.4060/cb1928en>
2. Schön N. L., Fraser P. M., Mackay A. D. Earthworms for inclusion as an indicator of soil biological health in New Zealand pastures. *New Zealand Journal of Agricultural Research*. 2023. Vol. 66, № 3. P. 208–223. URL: <https://www.deepdyve.com/lp/taylor-francis/earthworms-for-inclusion-as-an-indicator-of-soil-biological-health-in-2gwm6Bv3Xv>
3. Du Preez G., Daneel M., de Goede R. G. M., et al. Nematode-based indices in soil ecology: Application, utility, and future directions. *Soil Biology and Biochemistry*. 2022. Vol. 169. P. 108640. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071722000979?via%3Dihub>
4. DIN EN ISO 23611-3:2020. Soil quality – Sampling of soil invertebrates – Part 3: Sampling and extraction of enchytraeids (ISO 23611). Berlin: Deutsches Institut für Normung (DIN), 2020. URL: <https://webstore.ansi.org/standards/din/dineniso236112020>
5. Panagos P., Jones A., Lugato E., Ballabio C. A soil monitoring law for Europe. *Global Challenges*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1002/gch2.202400336>
6. Xing K., Lu W., Huang Q., Wu J., Shang H., Wang Q., Guo F., Du Q., Yin Z., Zhang Y., Li F. Soil eDNA biomonitoring reveals changes in multitrophic biodiversity and ecological health of agroecosystems. *Environmental Research*. 2024. № 262(Pt 2). P. 119931. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119931>
7. Steinke D., Perez K. H. J., Prosser S. W. J., Sones J. E., Agda J. R. A., deWaard S. L., deWaard J. R., Zakharov E. V., Ratnasingham S., Hebert P. D. N., Fryxell J. Metabarcoding arthropods in agroecosystems in Southern Ontario, Canada. *Biodiversity Data Journal*. 2025. № 13. P. e158459. DOI: <https://doi.org/10.3897/BDJ.13.e158459>
8. Köninger J., Ballabio C., Panagos P., Jones A., Schmid M. W., Orgiazzi A., Briones M. J. I. Ecosystem type drives soil eukaryotic diversity and composition in Europe. *Global Change Biology*. 2023. № 29(10). P. 3063–3078. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.16871>
9. Swart E., Martell E., Svendsen C., Spurgeon D. J. Soil ecotoxicology needs robust biomarkers: A meta-analysis approach to test the robustness of gene expression-based biomarkers for measuring chemical exposure effects in soil invertebrates. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 2022. № 41(9). P. 2124–2138. DOI: <https://doi.org/10.1002/etc.5402>
10. Beaumelle L., Thouvenot L., Hines J., Jochum M., Eisenhauer N., Phillips H. R. P. Soil fauna diversity and chemical stressors: A review of knowledge gaps and roadmap for future research. *Ecography*. 2021. № 44(6). P. 845–859. DOI: <https://doi.org/10.1111/ecog.05627>
11. Гамкало З., Шпаківська І., Марискевич О. Особливості оцінки С-протекторної здатності ґрунтів сільватизованих територій Полісся. Стан і біорізноманіття екосистем Шацького національного природного парку та інших природоохоронних територій: Матеріали конференції, присвяченої 100-річчю від дня народження К. А. Татарінова. Львів, 2021. С. 43–45. URL: [https://www.researchgate.net/publication/354586220\\_OSOLIVOSTI\\_OCINKI\\_S-PROTEKTORNOI\\_ZDATNOSTI\\_GRUNTIV\\_SILVATIZOVANIH\\_TERITORIJ\\_POLISSA\\_S43-45](https://www.researchgate.net/publication/354586220_OSOLIVOSTI_OCINKI_S-PROTEKTORNOI_ZDATNOSTI_GRUNTIV_SILVATIZOVANIH_TERITORIJ_POLISSA_S43-45)
12. Канарський Ю., Марискевич О., Андрєєва О., Кобів Ю., Микитчак Т. Збереження біорізноманіття і раритетних типів оселищ в умовах кліматичних змін. Наукові рекомендації. 2022. URL: <https://ecoinst.org.ua/pdf/zberezhennia-bioriznomanittia-recomendacii-2022.pdf>

Дата першого надходження рукопису до видання: 10.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 21.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025