

УДК 631.4:579.66:504.05:631.84
DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2026.149.2.40>

БІОТИЧНА АКТИВНІСТЬ ҐРУНТІВ: ВПЛИВ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ПРОДУКТІВ ПЕРЕРОБКИ ВІДХОДІВ ТВАРИНИЦТВА

Шевченко Н.О. – к.е.н.,
доцент кафедри екології,
Уманський національний університет
orcid.org/0000-0001-6722-9326

Вовк М.А. – аспірант кафедри екології,
Уманський національний університет
orcid.org/0009-0008-2145-0744

Кучеренко В.А. – аспірант кафедри екології,
Уманський національний університет
orcid.org/0009-0003-0865-2554

Понікарчик С.В. – аспірант кафедри екології,
Уманський національний університет
orcid.org/0009-0005-3152-3255

У статті розглянуто проблему впливу важких металів на біологічну активність ґрунтів різних біоценозів та ефективність застосування органічних добрив як чинника регуляції мікробних процесів. Ґрунт визначається як складна жива система, функціонування якої забезпечується діяльністю мікроорганізмів, ферментів та інших біотичних компонентів. Целюлозолітична активність використана як інтегральний показник актуальної біологічної активності, що відображає інтенсивність трансформації органічної речовини та рівень родючості ґрунту. Дослідження проведено у межах біоценозів м. Умань (лісопарковий, сприпоценоз та агроценоз), що дозволило порівняти природні та антропогенно трансформовані ґрунтові системи.

Методика базувалася на визначенні інтенсивності розкладання целюлозного полотна за методом Мічустіна, Вострової та Петрової, а також на аналізі вмісту Pb, Zn, Cu та Cd за допомогою атомно-абсорбційної спектрофотометрії. Встановлено обернену залежність між концентрацією важких металів та целюлозолітичною активністю: найбільш високі показники деструкції клітковини спостерігалися у сприпоценозі, тоді як агроценоз характеризувався найнижчими значеннями, що корелює з підвищеним рівнем забруднення.

Окрему увагу приділено впливу органічних добрив різного походження (компости з гною великої рогатої худоби, свиней, курячого посліду, вермікомпост та дигестат) на динаміку біологічної активності ґрунту. Показано, що вермікомпост та компост із курячого посліду забезпечують найвищий рівень целюлозолітичної активності, тоді як дигестат і компост із гною ВРХ діють більш стабільно та довготривало.

Результати дослідження підтверджують необхідність диференційованого підходу до застосування органічних добрив залежно від екологічних умов та цільових завдань землекористування. Перспективи подальших досліджень полягають у комплексному аналізі взаємозв'язку між целюлозолітичною активністю та іншими показниками біологічної активності ґрунту, а також у вивченні довготривалого впливу органічних добрив на стійкість ґрунтових екосистем до забруднення важкими металами.

Ключові слова: целюлозолітична активність ґрунту, важкі метали, мікробні угруповання, компост, вермікомпост, дигестат.



Shevchenko N.O., Vovk M.A., Kucherenko V.A., Ponikarchyk S.V. Biotic Activity of Soils: Impact of Heavy Metals and Prospects for the Use of Livestock Waste Processing Products

The article examines the problem of the impact of heavy metals on the biological activity of soils in different biocenoses and the effectiveness of organic fertilizers as a factor regulating microbial processes. Soil is defined as a complex living system whose functioning is ensured by the activity of microorganisms, enzymes, and other biotic components. Cellulolytic activity is used as an integral indicator of current biological activity, reflecting the intensity of organic matter transformation and the level of soil fertility. The study was conducted within the biocenoses of Uman (forest-park, subriparian, and agrocnosis), which allowed comparison of natural and anthropogenically transformed soil systems.

The methodology was based on determining the intensity of cellulose fabric decomposition according to the method of Mishustin, Vostrova, and Petrova, as well as analyzing the content of Pb, Zn, Cu, and Cd using atomic absorption spectrophotometry. An inverse relationship between heavy metal concentration and cellulolytic activity was established: the highest indicators of cellulose decomposition were observed in the subriparian biocenosis, while the agrocnosis was characterized by the lowest values, correlating with increased pollution levels.

Special attention was paid to the influence of organic fertilizers of different origins (composts from cattle manure, pig manure, poultry litter, vermicompost, and digestate) on the dynamics of soil biological activity. It was shown that vermicompost and poultry litter compost provide the highest level of cellulolytic activity, while digestate and cattle manure compost act more steadily and over a longer period.

The results of the study confirm the necessity of a differentiated approach to the application of organic fertilizers depending on ecological conditions and land use objectives. Prospects for further research include a comprehensive analysis of the relationship between cellulolytic activity and other indicators of soil biological activity, as well as the study of the long-term impact of organic fertilizers on the resilience of soil ecosystems to heavy metal pollution.

Key words: soil cellulolytic activity, heavy metals, microbial communities, compost, vermicompost, digestate.

Постановка проблеми. Ґрунт є складною живою системою, що забезпечує функціонування екосистем та продуктивність екосистем. Біотична активність ґрунтів, яка визначається діяльністю мікроорганізмів, ферментів та інших живих компонентів, відіграє ключову роль у процесах ґрунтоутворення, кругообігу речовин та підтриманні родючості. Вона є важливим індикатором екологічного стану ґрунтів та їхньої здатності забезпечувати стале сільське господарство [1].

Забруднення ґрунтів важкими металами є серйозною проблемою, що призводить до негативного впливу на властивості ґрунту та обмежує його продуктивні й екологічні функції. Ґрунтове мікробне співтовариство відіграє фундаментальну роль у процесах розкладання та мінералізації органічної речовини, що забезпечує кругообіг поживних елементів [2]. Важкі метали впливають на чисельність, різноманітність та активність ґрунтових мікроорганізмів. Вони можуть уповільнювати швидкість росту та розмноження мікроорганізмів, унаслідок чого в ґрунті переважають повільнорослі види з нижчим рівнем різноманітності, але з більшою стійкістю до важких металів, проте зі зниженою біологічною активністю [3].

Занепокоєння щодо важких металів у ґрунті зумовлене не лише їхньою токсичністю для живих організмів, що населяють ґрунт, але й їхньою здатністю до іммобілізації у складі різних органічних та неорганічних колоїдів. У такій іммобілізованій формі вони можуть зберігатися тривалий час, перш ніж знову стати доступними для живих організмів, включаючи рослини [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасній науковій літературі значна увага приділяється проблемі впливу важких металів на біотичну активність ґрунтів. Дослідження показують, що важкі метали змінюють чисельність та різноманітність ґрунтових мікроорганізмів, знижують їхню ферментативну активність та порушують процеси кругообігу поживних речовин [5]. Встановлено, що

під дією токсичних елементів у ґрунті переважають мікроорганізми з повільним ростом, які характеризуються більшою стійкістю до забруднення, але меншою біологічною активністю [6].

Ряд досліджень [7, 8] акцентують увагу на тому, що токсичність важких металів для мікрофлори залежить від комплексу факторів: рН ґрунту, температури, складу органічної речовини, наявності глинистих мінералів та форм, у яких метали перебувають. Це пояснює відмінності між результатами різних експериментів: одні підтверджують негативний вплив важких металів на мікробіологічну активність [9], інші не виявляють чіткої кореляції [10]. Відмінності між дослідженнями також пояснюються тим, що одні з них проводяться з використанням штучного забруднення ґрунту, підготовленого у лабораторних умовах, тоді як інші базуються на ґрунтах із реально забруднених територій. Кожен метод має свої переваги та недоліки. Проте мікробіологічні характеристики надають важливу інформацію про вплив забруднювачів на ґрунтову екосистему, і необхідно враховувати, що окрема мікробна характеристика не може бути використана універсально для моніторингу забруднення ґрунтів [11].

Таким чином, аналіз останніх досліджень свідчить про актуальність комплексного підходу до оцінки біотичної активності ґрунтів, що дозволяє більш об'єктивно визначати рівень їхнього забруднення важкими металами та прогнозувати наслідки для екосистем.

Постановка завдання. Метою дослідження є комплексна оцінка біологічної активності ґрунтів різних біоценозів за показником целюлозолітичної активності та встановлення взаємозв'язку між інтенсивністю розкладання клітковини і рівнем забруднення ґрунтів важкими металами. Завданням роботи є визначення особливостей функціонування ґрунтових мікробних угруповань у лісопарковому біоценозі, сприпоценозі та агроценозі, а також аналіз впливу внесення органічних добрив різного походження – компостів із гною великої рогатої худоби, свиней, курячого посліду, вермікомпосту та дигестату – на динаміку деструкційних процесів.

Методика досліджень. Визначення загальної біологічної активності ґрунту здійснювали за методом Мішустіна, Вострової та Петрової, який базується на оцінці інтенсивності розкладання полотна у ґрунтовому середовищі [12]. Цей підхід дозволяє кількісно характеризувати целюлозолітичну активність як інтегральний показник функціонування мікробних угруповань та їхньої ролі у трансформації органічної речовини. Дослідження проводилися у межах біоценозів м. Умань, що включали лісопаркові ділянки, сприпоценоз та агроценоз приміської зони, що забезпечило можливість порівняння природних і антропогенно трансформованих ґрунтових систем.

Продукти переробки відходів тваринництва вносили восени перед закладанням експерименту, що дозволяло простежити їхній вплив на процеси мінералізації целюлози у весняний та літній періоди наступного року.

Вміст важких металів у ґрунті визначали за стандартними методиками атомно-абсорбційної спектрофотометрії, що забезпечує високу точність та відтворюваність результатів. Це дозволило простежити кореляцію між рівнем забруднення ґрунтів токсичними елементами та інтенсивністю целюлозолітичних процесів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Вивчення біологічної активності ґрунту за допомогою методу розкладання клітковини у польових умовах дозволяє оцінити не лише швидкість деструкції рослинних решток, а й зробити висновки щодо забезпеченості ґрунту зв'язаними формами азоту. Серед органічних сполук

вуглецю клітковина є найбільш поширеною. Целюлозолітична активність належить до показників актуальної біологічної активності ґрунту, адже вона відображає його біологічний потенціал, процеси трансформації органічної речовини, характеризує енергетику кругообігу вуглецю мікроорганізмами та визначає рівень родючості й продуктивності ґрунтової біоти. Саме тому дослідження інтенсивності та спрямованості процесів розкладання клітковини залежно від природних і антропогенних чинників має велике наукове та практичне значення.

Важкі метали, що потрапляють у ґрунт внаслідок антропогенного навантаження, чинять істотний вплив на мікробні процеси. Вони здатні знижувати чисельність і різноманітність мікроорганізмів, пригнічувати ферментативну активність та змінювати напрямок трансформаційних процесів. Тому дослідження взаємозв'язку між целюлозолітичною активністю та рівнем забруднення ґрунтів важкими металами є важливим для розуміння механізмів деградації екосистем.

У цьому контексті порівняння різних біоценозів – лісопаркового, спривоценозу та агроценозу – дає можливість простежити, як природні та антропогенні фактори формують біологічний потенціал ґрунтів. Вивчення цих залежностей дозволяє не лише оцінити сучасний стан ґрунтових систем, але й визначити перспективи їхнього відновлення та підвищення стійкості до забруднення (табл. 1).

Таблиця 1

Целюлозолітична активність та вміст важких металів ґрунтів різних біоценозів

Місяць	Зменшення ваги за вегетаційний період, %	Оцінка целюлозолітичної активності	Pb, мг/кг	Zn, мг/кг	Cu, мг/кг	Cd, мг/кг
Лісопарковий біоценоз						
Червень	61,6	Сильна	14,9	27,9	2,2	1,34
Липень	49,4	Середня	34,1	64,8	18,6	1,89
Серпень	40,7	Середня	51,1	129,8	31,3	2,23
Спривоценоз						
Червень	83,3	Дуже сильна	43,5	73,8	21,8	2,63
Липень	81,5	Дуже сильна	34,1	64,8	18,6	1,89
Серпень	67,6	Сильна	51,1	129,8	31,3	2,23
Агроценоз						
Червень	45,5	Середня	55,2	140,3	35,7	2,71
Липень	38,7	Слабка	62,8	152,6	41,2	2,85
Серпень	29,6	Слабка	70,5	165,4	47,9	2,93

Аналіз отриманих даних свідчить про наявність оберненої залежності між вмістом важких металів у ґрунті та його целюлозолітичною активністю. У лісопарковому біоценозі, де концентрації Pb, Zn, Cu та Cd є нижчими, спостерігається відносно високий рівень розкладання клітковини, що підтверджує сприятливі умови для функціонування мікробних угруповань.

Спривоценоз, представлений дендропарком «Софіївка», демонструє найвищі показники активності, що може бути пояснено високим біорізноманіттям та

стабільністю екосистеми. Незважаючи на наявність певного забруднення, ґрунт цього біоценозу зберігає значний біологічний потенціал, що свідчить про його стійкість до впливу токсичних елементів.

Агроценоз характеризується найнижчими показниками целюлозолітичної активності, що корелює з найвищими концентраціями важких металів. Це підтверджує негативний вплив інтенсивного землекористування, застосування агрохімікатів та накопичення токсичних елементів на ґрунтову мікрофлору. Зниження активності свідчить про деградацію біологічних процесів та зменшення родючості ґрунту.

Внесення різних видів органічних добрив – компостів із гною великої рогатої худоби, свиней, курячого посліду, а також вермікомпосту (продукту біологічної переробки органічних відходів за участю дощових черв'яків) та дигестату (залишкового продукту після анаеробного зброджування гною у біогазових установках) – формує різні умови для розвитку мікробних угруповань і визначає динаміку деструкційних процесів протягом вегетаційного періоду. Кожен із цих видів добрив має власні особливості складу та впливу на ґрунтову біоту. Таким чином, використання компостів, вермікомпосту та дигестату дозволяє не лише утилізувати відходи тваринництва, але й створює різні сценарії розвитку мікробних угруповань, що визначають інтенсивність розкладу органічної речовини та рівень біологічної активності ґрунту (рис. 1).

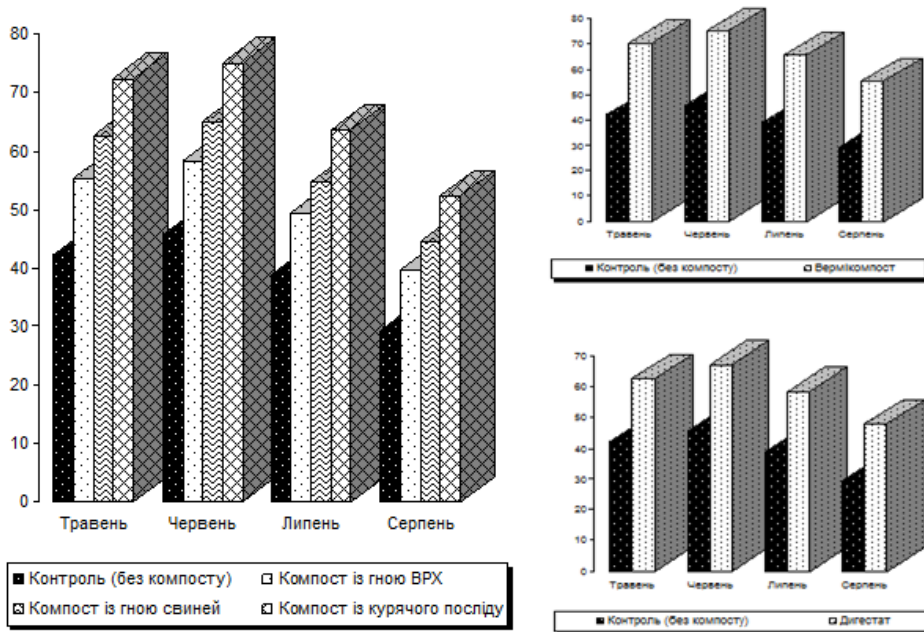


Рис. 1. Динаміка целюлозолітичної активності ґрунту (%) залежно від використання продуктів переробки відходів тваринництва

Аналіз показників, що відображають динаміку целюлозолітичної активності ґрунту при внесенні компостів із гною різних тварин, вермікомпосту та дигестату,

свідчить про суттєві відмінності у впливі цих органічних добрив на мікробні процеси трансформації органічної речовини. Отримані результати підтверджують, що якісний склад добрив, зокрема вміст азоту, фосфору та калію, визначає інтенсивність розкладу целюлози та рівень біологічної активності ґрунту протягом вегетаційного періоду.

Компости із гною великої рогатої худоби забезпечують стабільний, але помірний стимулюючий ефект, що проявляється у поступовому зростанні активності мікроорганізмів. Свинячий компост характеризується вищим вмістом азоту та фосфору, що сприяє швидшій мінералізації органічної речовини, проте ефект є менш тривалим. Курячий послід демонструє максимальні показники активності завдяки високій концентрації поживних елементів, однак його використання потребує обережності через ризик засолення ґрунту.

Вермікомпост, як продукт біологічної переробки органічних відходів дощовими черв'яками, забезпечує найвищий рівень целюлозолітичної активності. Це пояснюється не лише високим вмістом доступних форм макроелементів, але й наявністю біологічно активних речовин, що стимулюють розвиток ґрунтової мікрофлори. Дигестат, отриманий після анаеробного зброджування, має більш помірний, але стабільний ефект, забезпечуючи поступове живлення мікроорганізмів і знижуючи ризики екологічного навантаження.

Таким чином, результати дослідження підтверджують, що внесення органічних добрив різного походження формує різні сценарії розвитку ґрунтових мікробних угруповань і визначає характер деструкційних процесів. Найбільш інтенсивний ефект спостерігається при використанні вермікомпосту та компосту з курячого посліду, тоді як дигестат і компост із гною ВРХ забезпечують більш стабільну, довготривалу дію. Це свідчить про необхідність диференційованого підходу до застосування органічних добрив залежно від агроекологічних умов та цільових завдань землекористування.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Отримані результати підтверджують, що целюлозолітична активність ґрунту є чутливим індикатором його біологічного потенціалу та відображає вплив як природних, так і антропогенних чинників. Встановлено обернену залежність між вмістом важких металів та інтенсивністю розкладання клітковини: у ґрунтах із нижчими концентраціями Pb, Zn, Cu та Cd спостерігається вищий рівень біологічної активності. Лісопарковий біоценоз характеризується відносно сприятливими умовами для функціонування мікробних угруповань, сприюценоз демонструє найвищу стійкість і біорізноманіття, тоді як агроценоз зазнає найбільшого негативного впливу інтенсивного землекористування та накопичення токсичних елементів.

Внесення органічних добрив різного походження формує різні сценарії розвитку ґрунтової мікрофлори. Найбільш інтенсивний ефект спостерігається при використанні вермікомпосту та компосту з курячого посліду, що забезпечують високий рівень целюлозолітичної активності. Дигестат і компост із гною великої рогатої худоби діють більш стабільно та довготривало, підтримуючи поступове живлення мікроорганізмів і екологічну рівновагу. Це свідчить про необхідність диференційованого підходу до застосування органічних добрив залежно від екологічних умов та цільових завдань землекористування.

Перспективи подальших досліджень полягають у розширенні аналізу взаємозв'язку між целюлозолітичною активністю та іншими показниками біологічної активності ґрунту (нітрогеназна активність, субстрат-індукована респірація,

ферментативний профіль), а також у вивченні довготривалого впливу органічних добрив на мікробні угруповання та стійкість ґрунтових екосистем до забруднення важкими металами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Iost S., Makeschin F., Abiy M., Haubrich F. Biotic Soil Activities. In: Beck E., Bendix J., Kottke I., Makeschin F., Mosandl R. (eds) Gradients in a Tropical Mountain Ecosystem of Ecuador. *Ecological Studies*, 2008. vol 198. https://doi.org/10.1007/978-3-540-73526-7_21
2. Mauro Sarah. Biotic and Abiotic Interactions: The Key Drivers of Soil Microbiome Composition and Health. *J. Biodivers. Biopros. Dev.*, 2025. 11. 138.
3. Xiong Chao, Yahai Lu. Microbiomes in agroecosystem: Diversity, function and assembly mechanisms. *Environ. Microbiol. Rep.*, 2022. 14. P. 833–849.
4. Lee C.S., Li X.D., Shi W.Z., Cheung S.C., Thornton L. Metal contamination in urban, suburban, and country park soils of Hong Kong: A study based on GIS and multivariate statistics. *Sci. Total Environ.*, 2006. 356. 45.
5. Castaldi Simona, Rutigliano Flora, Virzo De Santo Amalia. Suitability of soil microbial parameters as indicators of heavy metal pollution. *Water Air and Soil Pollution*, 2004. 158. P. 21–35. <https://doi.org/10.1023/B:WATE.0000044824.88079.d9>
6. Волгогон В.В. Значення мікроорганізмів для здоров'я ґрунтів та оптимізації формування біоценозів. *Фізіологія рослин і генетика*, 2024. Т. 56, № 1. С. 3–26. [10.15407/frg2024.01.003](https://doi.org/10.15407/frg2024.01.003)
7. Nannipieri P., Badalucco L., Kandeler E., Ruggiero, P. Microbial response to heavy metals in soils. In: Nannipieri, P., Smalla, K. (eds.). *Soil Biochemistry*, 1997. Vol. 9. P. 269–300.
8. Giller K.E., Witter E., McGrath S.P. Toxicity of heavy metals to microorganisms and microbial processes in agricultural soils: A review. *Soil Biology & Biochemistry*, 1998. Vol. 30. Issues 10–11. P. 1389–1414.
9. Hou D., Wang R., O'Connor D. Metal contamination and bioremediation of agricultural soils for food safety and sustainability. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020. 1. P. 366–381. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0055-7>
10. González Henao S., Ghneim-Herrera, T. Heavy Metals in Soils and the Remediation Potential of Bacteria Associated With the Plant Microbiome. *Frontiers in Environmental Science*, 2021. 9. 604216. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.604216>
11. Li J., Wang Y., Chen X. Bacterial–fungal interactions and response to heavy metal contamination of soil in agricultural areas. *Frontiers in Microbiology*, 2024. 15. 1395154. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1395154>
12. Пати́ка В.П., Волгогон В.В., Пасі́чник Л.А. Оці́нка і підви́щення біогенно́сті ґрунті́в в агро́цено́зах: науко́во-мето́дичні реко́мендації. Київ: НАН України, 2024. 62 с.

Дата першого надходження статті до видання: 30.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026