

БІОЛОГІЧНІ ІНДИКАТОРИ ДЕГРАДАЦІЇ ҐРУНТІВ У КОНТЕКСТІ ГЛОБАЛЬНИХ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН

МЕЛЬНИК-ШАМРАЙ В. В. – кандидат сільськогосподарських наук

orcid.org/0000-0002-3551-5085

Державний університет «Житомирська політехніка»

КРАВЧУК-ОБОДЗІНСЬКА Т. В. – доктор філософії

orcid.org/0000-0002-1898-2837

Державний університет «Житомирська політехніка»

АЛПАТОВА О. М. – кандидат біологічних наук

orcid.org/0000-0003-0803-9850

Державний університет «Житомирська політехніка»

СІКАЧ Т. І. – асистент

orcid.org/0009-0001-1557-0992

Державний університет «Житомирська політехніка»

Постановка проблеми. З одного боку, глобальні кліматичні зміни посилюють чинники деградації ґрунтів, а саме зменшення вологості, інтенсивні опади, температурний стрес та ерозійні процеси. Україна, як аграрна країна з великими сільськогосподарськими площами, вже проявляє симптоми деградації: згідно з даними, близько 57 % території країни піддається водно-вітровій ерозії, 18 % земель зазнають кислотності, 6 % – засолення тощо. Також через бойові дії, рух техніки та забруднення через масовані обстріли спостерігаються значні порушення структури ґрунтів, зниження мікробної біомаси й активності ґрунтової біоти [1].

З іншого боку, існує різниця між науковими підходами: біологічні індикатори часто вважаються як перспективні засоби оцінки стану ґрунтів, але їх системне впровадження у національні моніторингові програми є обмежене. Наприклад, хоча мікробна біомаса, активність ферментів, мікробне дихання часто називають ефективними показниками здоров'я ґрунту [2], проте немає єдиного консенсусу, який саме набір індикаторів є найбільш чутливим до кліматичних стресів у різних ґрунтових зонах. У літературі підкреслюють просторову й часову змінність цих індикаторів як виклик для їх стандартизації [3]. Саме тому ключовою проблемою є недостатня адаптація існуючих систем моніторингу ґрунтів до нових кліматичних умов.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідження біологічних індикаторів або біоіндикаторів ґрунту, це вимірювання характеристики живих компонентів ґрунту або їх функцій: мікробна біомаса, активність ферментів, мікробне дихання, співвідношення дихання до біомаси (qCO_2), показник мікробної частки ($qMIC$) тощо. Вони вважаються «чутливими маркерами» змін, адже реагують на стресові зміни раніше, ніж змінюються фізико-хімічні властивості ґрунту [3].

У класичних дослідженнях також використовувалися біоіндикатори з ґрунтової фауни – наприклад, кількість дощових черв'яків, німатод. Наприклад, екологічні характеристики співтовариств німатод (різноманіття, структура, метаболічний внесок) корелюють з рівнем порушень ґрунту та ступенем забруднення [4, 7].

Дослідження у різних кліматичних умовах показують, що біологічні індикатори у ґрунті можуть слугувати для виявлення деградації через кліматичний стрес. Наприклад, наукові дослідження показують, що функціональна різноманітність мікробіоти є чутливим показником продуктивності агроєкосистем під впливом змін у режимі використання ґрунтів [5, 8].

В умовах України особливо цікаві зміни мікрофлори під впливом агротехнічних прийомів і кліматичних факторів: дослідження 2016–2020 рр. у Херсонській області показали, що мінеральне живлення та інокуляція бактеріями впливали на склад ґрунтових мікроорганізмів; ураження війною також призвело до зниження мікробної біомаси та пригнічення активності мікроорганізмів на зонах бойових дій [6, 9]. Наприклад, дослідження у Харківському регіоні підкреслює, що в місцях бойових дій структуру ґрунту змінено, а біотичні показники впали в 2 і більше разів порівняно із контрольними ділянками.

Також сучасні роботи підкреслюють, що біологічні індикатори часто реагують достовірніше та швидше, ніж фізико-хімічні, і можуть слугувати ранніми попереджувальними сигналами деградації ґрунтів, особливо в умовах кліматичної нестабільності.

Мета досліджень. Метою нашого дослідження є визначення, як кліматичний градієнт вологих та посушливих умов впливає на ключові біологічні індикатори ґрунтового здоров'я.

Матеріали та методи досліджень. Дослідження проводили у трьох природно-кліматичних зонах України – Поліссі, Лісостепу та Степу, які відрізняються рівнем зволоження, температурними режимами та ризиками деградації ґрунтів.

У зразках визначали низку біологічних, фізико-хімічних і кліматичних показників. До біологічних індикаторів відносили мікробну біомасу вуглецю (МБС), активність ґрунтових ферментів (дегідрогенази та фосфатази), коефіцієнт метаболічної активності qCO_2 . Серед фізико-хімічних характеристик оцінювали вміст органічного вуглецю, реакцію ґрунтового розчину, щільність складання, вологість, електропровідність та гранулометричний

склад. Кліматичні параметри включали індекс аридності, сезонну суму опадів та максимальні температури під час спекотного періоду, які визначалися за даними місцевих метеостанцій.

Результати досліджень. Аналіз кліматичних характеристик для основних агрокліматичних зон України, а саме Полісся, Лісостепу та Степу, підтвердив наявність вираженого градієнта зволоження та температурних режимів. Протягом останніх років досліджень спостерігається тенденція до зростання середньорічних температур та зменшення кількості опадів у південних регіонах, що спричиняє посилення аридності й більш часті періоди літніх посух. Натомість Полісся характеризується стабільнішими умовами вологозабезпечення та нижчими температурними екстремумами, що створює контрастні умови для розвитку ґрунтових біоценозів у межах однієї країни.

У зв'язку з цими спостереженнями було проведено комплекс польових досліджень у 2023-2024 роках, спрямованих на оцінку біологічних індикаторів ґрунтового здоров'я у трьох кліматично контрастних зонах. Такий підхід дозволив комплексно оцінити вплив кліматичного градієнта на стан ґрунтової біоти та визначити відмінності між зонами.

На рисунку 1 зображено середні значення мікробної біомаси вуглецю (МВС, мг С/кг ґрунту) у трьох основних кліматичних зонах України, а саме Поліссі, Лісостепу та Степу. Дані спостережень свідчать про чітку тенденцію

до зниження біологічної активності ґрунту в напрямку від північних до південних регіонів.

Полісся характеризується найвищими показниками МВС, близько 400 мг С/кг, що пояснюється вищою вологістю, помірними температурами та більшим вмістом органічної речовини. Тоді як у Лісостепу спостерігається помірне зниження мікробної біомаси, приблизно 330 мг С/кг, через більш континентальний клімат і періодичні посухи. Степова ж зона має найнижчі показники, приблизно 250 мг С/кг, що свідчить про зниження біологічної активності ґрунтів у посушливих умовах з високими температурами.

Загалом дані дослідження свідчать, що мікробна біомаса ґрунту є чутливим індикатором аридності, і її рівень зменшується зі зростанням посушливості клімату.

На рисунку представлено розподіл показника qCO_2 (мг CO_2 -С г⁻¹ МВС год⁻¹) у ґрунтах трьох кліматичних зон України. Даний показник характеризує ефективність використання вуглецю мікробною біотою, тобто співвідношення між дихальною активністю та мікробною біомасою.

У зоні Полісся спостерігаються найнижчі середні значення qCO_2 , що свідчить про стабільну мікробну систему та ефективне використання органічного вуглецю. У зоні Лісостепу спостерігаються проміжні значення, які вказують на помірне навантаження на ґрунтову біоту. Зона Степу характеризується найвищими показниками, що є ознакою стресових умов для мікроорганізмів, пов'язаних із посухою та високими температурами.

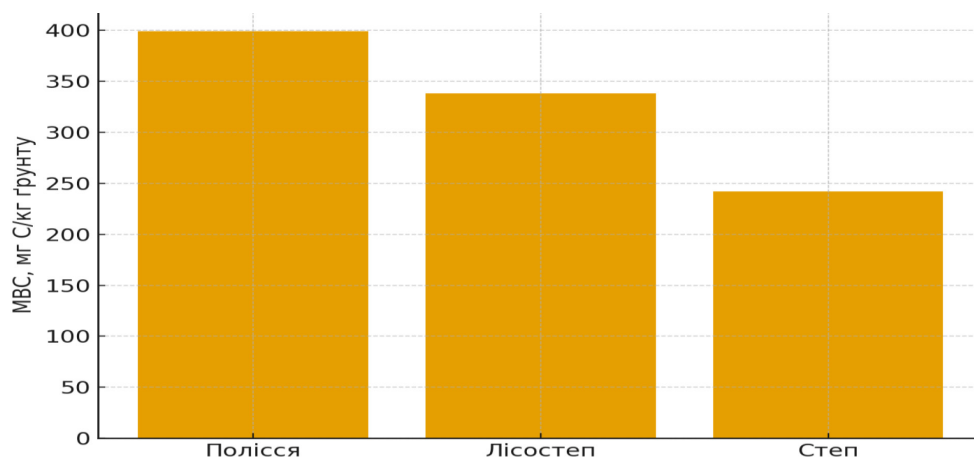


Рис. 1. Середня мікробна біомаса (МВС) за зонами

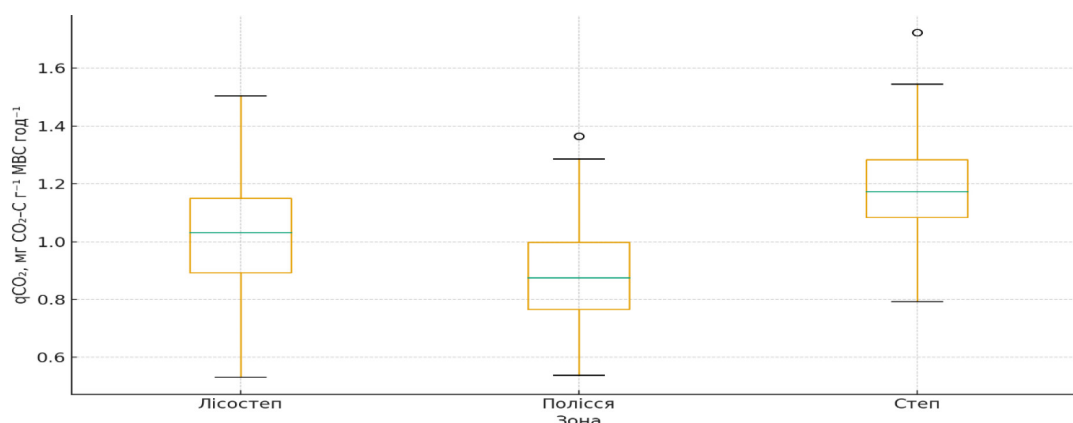


Рис. 2. Варіації показника qCO_2 у різних кліматичних зонах України

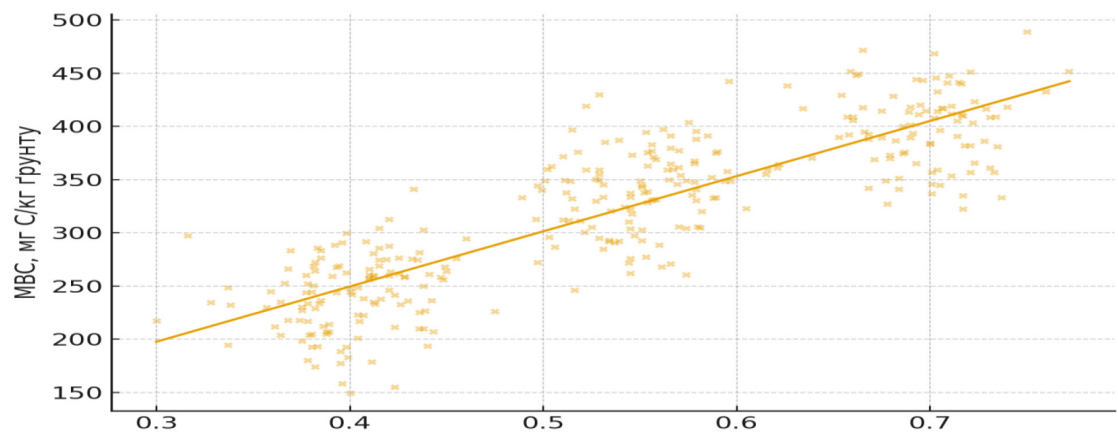


Рис. 3. Залежність між аридністю та МВС

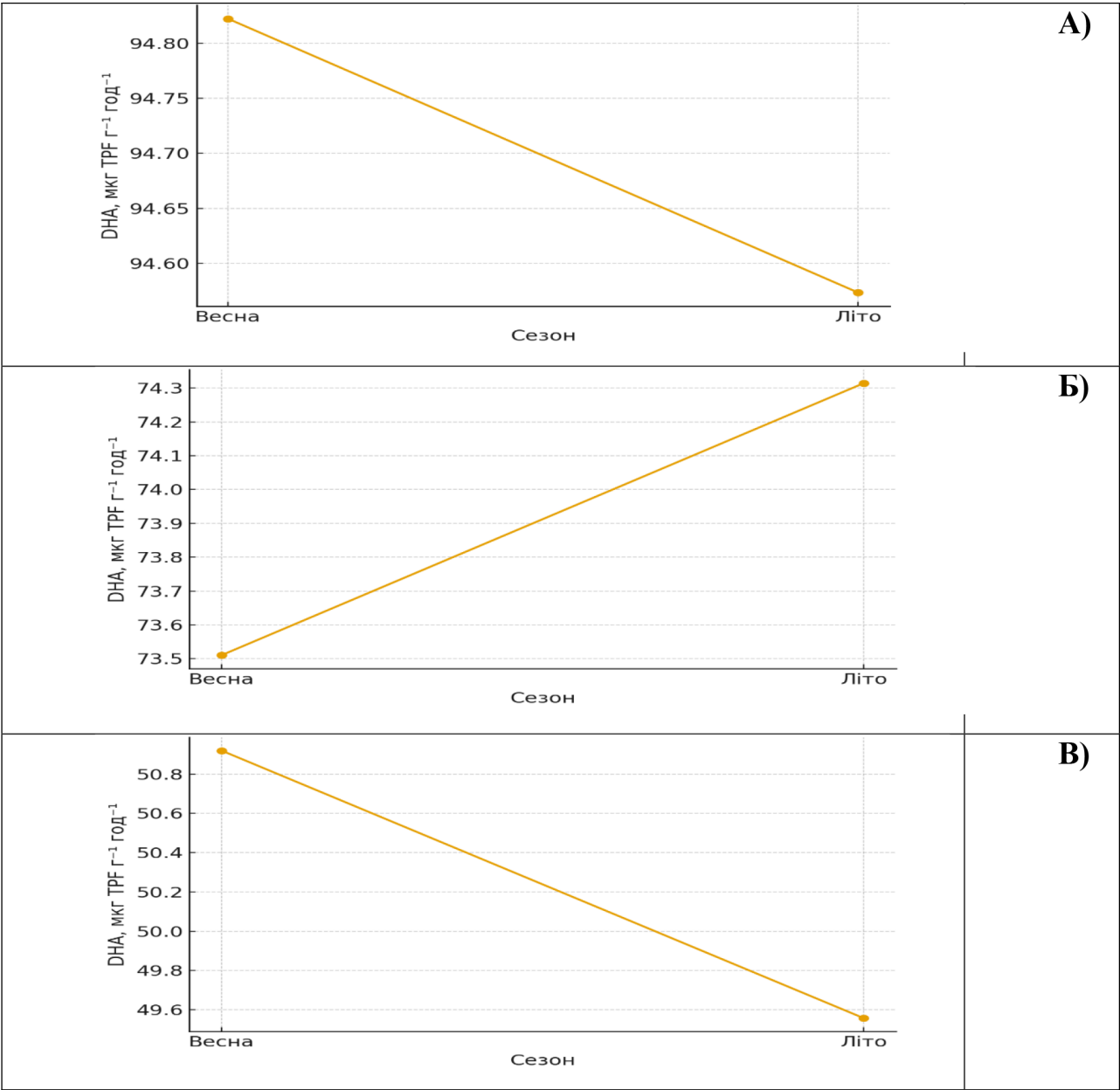


Рис. 4. Активність дегідрогенази (DHA) за сезонами (А) Полісся, Б) Лісостеп, В) Степ

Таким чином, із посиленням аридності від Полісся до Степу зростає також qCO_2 , що відображає зниження ефективності мікробних процесів і потенційне погіршення біологічного стану ґрунтів.

На рисунку відображена залежність між індексом аридності та мікробною біомасою вуглецю у ґрунтах різних кліматичних зон. Чітко видно позитивну кореляцію: зі зростанням індексу аридності (тобто за умов меншої посушливості та кращого зволоження) значення МВС збільшуються.

Це свідчить, що у більш вологих регіонах мікробна біомаса значно вища, що свідчить про активніший обмін речовин і краще функціонування ґрунтової біоти. У більш сухих зонах спостерігається зменшення МВС, що вказує на пригнічення мікробної активності через дефіцит вологи та високі температури.

Отже, ступінь аридності є визначальним кліматичним фактором, що безпосередньо впливає на біологічну продуктивність і здоров'я ґрунтів.

На рисунку зображено зміну активності дегідрогенази (DNA) у ґрунтах різних кліматичних зон, а саме Полісся, Лісостепу та Степу, упродовж двох сезонів. Цей показник відображає інтенсивність біологічних процесів і рівень мікробної активності в ґрунті.

У зоні Полісся спостерігається стабільно висока ферментативна активність, що свідчить про сприятливі умови вологості та температури. Влітку вона дещо знижується, ймовірно, через тимчасове пересихання поверхневого шару ґрунту. У зоні Лісостепу відмічається більш помітне зниження DNA влітку, що свідчить про чутливість мікроорганізмів до дефіциту вологи та підвищених температур. У зоні Степу активність дегідрогенази найнижча вже навесні і ще більше падає влітку, що відображає стресові умови посушливого клімату та низьку біологічну активність.

Таким чином, динаміка DNA демонструє чітку закономірність: ферментативна активність ґрунту зменшується зі зростанням аридності, що робить цей показник надійним біоіндикатором сезонних і кліматичних змін.

Головні висновки. Результати наших досліджень підтверджують, що біологічна активність ґрунтів України має виражену зональну диференціацію, тісно пов'язану з кліматичним градієнтом аридності. За досліджуваний період спостерігається поступове зниження мікробної біомаси та активності ферментів, а також підвищення питомого дихання мікробіоти, що вказує на збільшення енергетичних витрат мікроорганізмів за умов стресу.

Позитивна залежність між індексом аридності та МВС свідчить, що зволоження є ключовим чинником підтримання ґрунтової біоти. Водночас сезонна динаміка DNA демонструє високу чутливість мікробної активності до змін температури та вологості, особливо в посушливих регіонах.

Загалом результати наших досліджень свідчать, що мікробна біомаса, дегідрогеназна активність і qCO_2 можуть бути використані як інтегральні біоіндикатори екологічного стану та деградації ґрунтів у різних кліматичних умовах України, а їх поєднане застосування дає змогу оцінювати стійкість агроєкосистем до кліматичних стресів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Solokha M., Demyanyuk O., Symochko L., Mazur S., Vynokurova N., Sementsova K., Mariychuk R. Soil Degradation and Contamination Due to Armed Conflict in Ukraine. *Land*. 2024. 13(10), 1614. <https://doi.org/10.3390/land13101614>
2. Alt D. S., Paul P. A., Lindsey A. J., Lindsey L. E. Early Wheat harvest influenced grain quality and profit but not yield. *Crop, Forage & Turfgrass Management*. 2019. 5, 1. Article 190001. doi: 10.2134/cftm2019.01.0001
3. Bhaduri D., Sihi D., Bhowmik A., Verma B. C., Munda S., Dari B. A review on effective soil health bio-indicators for ecosystem restoration and sustainability. *Frontiers in microbiology*. 2022. 13, 938481. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.938481>
4. Jennifer D. KnoeppaY., David C. Coleman, D. A. Crossley Jr. b, James S. Clark. Biological indices of soil quality: an ecosystem case study of their use. *Forest Ecology and Management*. 2000. № 138. 357–368.
5. Steinberger Y., Stein A., Dorman M. A sensitive soil biological indicator to changes in land-use in regions with Mediterranean climate. *Sci Rep*. 2022. 12. 22216. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26240-9>
6. Drobitko A., Markova N., Tarabrina A., Tereshchenko A.. Land degradation in Ukraine: retrospective analysis 2017–2022. *International Journal of Environmental Studies*. December 2022. 80(13):1–8. <https://doi.org/10.1080/00207233.2022.2160079>
7. Романчук Л. Д., Кравчук Т. В. Концентрація важких металів у ґрунті при вирощуванні амаранту в умовах Житомирського Полісся. *Аграрні інновації*. 2024. № 25. С. 58–60.
8. Кравчук-Ободзінська Т. В. Біохімічний склад фітомаси амаранту залежно від сорту та системи удобрення. *Аграрні інновації*. 2024. № 28. С. 48–52.
9. Романчук Л. Д., Кравчук-Ободзінська Т. В. Амарант і традиційні культури: біохімічна характеристика та перспективи використання. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Серія: Сільськогосподарські науки*. 2024. Випуск 4(108). С. 194–204.

REFERENCES:

1. Solokha M., Demyanyuk O., Symochko L., Mazur S., Vynokurova N., Sementsova K., & Mariychuk, R. (2024). Soil Degradation and Contamination Due to Armed Conflict in Ukraine. *Land*, 13(10), 1614. <https://doi.org/10.3390/land13101614>
2. Alt, D. S., Paul, P. A., Lindsey, A. J., & Lindsey, L. E. (2019) Early Wheat harvest influenced grain quality and profit but not yield. *Crop, Forage & Turfgrass Management*. 5, 1. Article 190001. doi: 10.2134/cftm2019.01.0001
3. Bhaduri, D., Sihi, D., Bhowmik, A., Verma, B. C., Munda, S., & Dari, B. (2022). A review on effective soil health bio-indicators for ecosystem restoration and sustainability. *Frontiers in microbiology*, 13, 938481. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.938481>
4. Jennifer D. KnoeppaY., David C. Coleman, D.A. Crossley Jr.b & James S. Clark (2000). Biological indices of soil quality: an ecosystem case study of their use. *Forest Ecology and Management*. 138, 357–368.
5. Steinberger, Y., Stein, A. & Dorman, M. (2022) A sensitive soil biological indicator to changes in land-use in regions with Mediterranean climate. *Sci Rep* 12, 22216. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26240-9>

6. Drobitko A., Markova N., Tarabrina A., & Tereshchenko A. (2022) Land degradation in Ukraine: retrospective analysis 2017–2022. *International Journal of Environmental Studies* 80(13):1-8. DOI:10.1080/00207233.2022.2160079
7. Romanchuk L. D., Kravchuk T. V. (2024) Kонтсентratsiia vazhkykh metaliv u grunti pry vyroshchuvanni amaranu v umovakh Zhytomyrskoho Polissia. [Concentration of heavy metals in soil during amaranth cultivation in the conditions of Zhytomyr Polissya.]. *Ahrarni innovatsii*. № 25. P. 58–60. [in Ukrainian].
8. Kravchuk-Obodzinska T. V. (2024) Biokhimichni sklad fitomasy amaranu zalezhno vid sortu ta systemy udobrennia. [Biochemical composition of amaranth phytomass depending on the variety and fertilization system.]. *Ahrarni innovatsii*. № 28. P. 48–52. [in Ukrainian].
9. Romanchuk L. D., Kravchuk-Obodzinska T. V. (2024) Amarant i tradytsiini kultury: biokhimichna kharakterystyka ta perspektyvy vykorystannia [Amaranth and traditional crops: biochemical characteristics and prospects for use.]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia. Seria: Silskohospodarski nauky*. № 4(108). P. 194–204.

Мельник-Шамрай В. В., Кравчук-Ободзінська Т. В., Алпатова О. М., Сікач Т. І. Біологічні індикатори деградації ґрунтів у контексті глобальних кліматичних змін

У статті розглянуто актуальну проблему деградації ґрунтів у контексті глобальних кліматичних змін, яка на даний час набуває критичного значення для забезпечення екологічної та продовольчої безпеки. Ґрунтові ресурси є основою функціонування агроєкосистем, однак під впливом зростання температури, частоти посух, ерозійних процесів та інтенсифікації землекористування відбувається істотне зниження їхньої біологічної активності та здатності до самовідновлення. Особливу увагу приділено ролі біологічних індикаторів як чутливої та інтегральної системи оцінювання екологічного стану ґрунтів, що відображає реакцію живих компонентів ґрунтової екосистеми на зміни кліматичних умов.

Метою дослідження є встановлення зв'язку між градієнтом аридності та ключовими біоіндикаторами ґрунтового здоров'я в різних природно-кліматичних зонах України (Полісся, Лісостеп, Степ). Для цього проаналізовано показники мікробної біомаси вуглецю (МБС), ферментативної активності (дегідрогеназа, фосфатаза), питомого дихання мікробіоти (qCO_2), структури ґрунтових безхребетних та співвідношення фізико-хімічних властивостей. Результати показали чітку зональну тенденцію: зі збільшенням аридності спостерігається зниження мікробної біомаси, ферментативної активності та чисельності дощових черв'яків, тоді як qCO_2 зростає, що свідчить про підвищене навантаження на мікробну систему.

У зоні Полісся біологічна активність залишається стабільно високою завдяки помірному клімату та підвищеній вологості. Для Лісостепу характерна сезонна мінливість показників, зокрема зниження дегідрогеназної активності в літній період через дефіцит вологи. Найбільш виражене пригнічення біологічної активності

спостерігається у Степу, де висока температура та низький рівень опадів створюють стресові умови для ґрунтової біоти. Це доводить, що біологічні властивості ґрунту є одними з найчутливіших індикаторів деградації, які реагують швидше, ніж фізико-хімічні параметри.

Результати наших досліджень підтверджують, що біологічні індикатори є ефективним інструментом комплексної оцінки стану ґрунтів, чутливо реагують на зміни клімату та можуть слугувати основою для розроблення адаптивних стратегій сталого землеробства.

Ключові слова: кліматичні чинники, біотехнології, екологічна безпека, ґрунти, ґрунтова біота, кліматологія, біологія, екологія, продовольча безпека.

Melnyk-Shamray V. V., Kravchuk-Obodzinska T. V., Alpatova O. M., Sikach T. I. Biological indicators of soil degradation in the context of global climate change

The article discusses the pressing issue of soil degradation in the context of global climate change, which is currently becoming critical for ensuring environmental and food security. Soil resources are the basis for the functioning of agroecosystems, but under the influence of rising temperatures, frequent droughts, erosion processes, and intensified land use, there is a significant decrease in their biological activity and ability to self-regenerate. Particular attention is paid to the role of biological indicators as a sensitive and integral system for assessing the ecological state of soils, reflecting the response of living components of the soil ecosystem to changes in climatic conditions.

The aim of the study is to establish a relationship between the aridity gradient and key bioindicators of soil health in different natural and climatic zones of Ukraine (Polissya, Forest-Steppe, Steppe). To this end, we analyzed indicators of microbial biomass carbon (MBC), enzymatic activity (dehydrogenase, phosphatase), specific respiration of microbiota (qCO_2), soil invertebrate structure, and the ratio of physicochemical properties. The results showed a clear zonal trend: with increasing aridity, there is a decrease in microbial biomass, enzymatic activity, and earthworm abundance, while qCO_2 increases, indicating an increased load on the microbial system.

In the Polissya zone, biological activity remains consistently high due to the temperate climate and high humidity. The forest-steppe zone is characterized by seasonal variability in indicators, in particular a decrease in dehydrogenase activity in the summer due to moisture deficiency. The most pronounced suppression of biological activity is observed in the Steppe, where high temperatures and low precipitation create stressful conditions for soil biota. This proves that the biological properties of soil are among the most sensitive indicators of degradation, reacting faster than physicochemical parameters.

The results of our research confirm that biological indicators are an effective tool for comprehensive assessment of soil condition, are sensitive to climate change, and can serve as a basis for developing adaptive strategies for sustainable agriculture.

Key words: climatic factors, biotechnology, environmental safety, soils, soil biota, climatology, biology, ecology, food security.

Дата першого надходження рукопису до видання: 29.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 14.12.2025