

УДК 502.3/7 + 574 + 579.6

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.144.39>

ВПЛИВ БІОДЕСТРУКТОРІВ РОСЛИННИХ РЕШТОК НА ФЕРМЕНТАТИВНУ АКТИВНІСТЬ ҐРУНТУ

Мовчан І.П. – аспірант,

Інститут агроекології і природокористування

Національної академії аграрних наук України

orcid.org/0009-0002-0647-6133

Бунас А.А. – к.б.н., с.д.,

старший науковий співробітник лабораторії екології мікроорганізмів,

Інститут агроекології і природокористування

Національної академії аграрних наук України

orcid.org/0000-0003-4806-7004

Шерстобосєва О.В. – д.с.-г.н., професор,

провідний науковий співробітник відділу агроекології і біобезпеки,

Інститут агроекології і природокористування

Національної академії аграрних наук України

orcid.org/0000-0001-8239-0847

Одним із ключових чинників деградації агроєкосистем є надмірне накопичення рослинних решток на поверхні ґрунту в поєднанні зі зниженням метаболічної активності ґрунтової мікробіоти. Це спричиняє погіршення агрофізичних властивостей ґрунту, порушення в балансі ґрунтоутворних процесів та трансформації органічної речовини в агроценозах та підвищення ризику розвитку фітопатогенних мікроорганізмів, які накопичуються в органічних рештках та ґрунті. Відповідно такі виклики актуалізують необхідність перегляду традиційних агротехнологій і введення екологізації агротехнологій шляхом застосування біодеструкторів.

Метою дослідження було оцінювання ефективності деструкції пшеничної соломи під дією біодеструкторів Polymix, MicoCell та їх поєднання з аміачною селітрою в лабораторних умовах шляхом визначення ферментативної активності ґрунту. Об'єктом дослідження слугував чорнозем типовий, у який вносили подрібнену солому та біопрепарати в різних варіантах. В дослідженні визначали зміну маси соломи, рівень уреазної, поліфенолоксидазної та пероксидазної активності, а також розраховували ферментативні індекси (Knp та If).

Результати засвідчили, що комбіноване застосування Polymix і MicoCell сприяло найвищому рівні уреазної активності (4,0 мг N-NH₄/г/год) та зниженню маси соломи на 23,2 % порівняно з контролем. Активність поліфенолоксидази й пероксидази для даного варіанту зростала у 6,4 та 3,5 рази відповідно. Розраховані індекси If (1,97) та Knp (1,08) вказують на інтенсифікацію аеробних окисно-відновних процесів у ґрунті.

Таким чином, ферментативна активність це чутливий індикатор ефективності мінералізації органічних решток в екосистемах і маркер біологічної активності мікробіому при застосуванні біопрепаратів, що підтверджує доцільність їх інтеграції в агротехнології сталого землеробства.

Ключові слова: пероксидаза, поліфенолоксидаза, уреаза, біодеструктори, ґрунт, ферментативний індекс окисно-відновної активності (If), коефіцієнт поліфенолоксидазної-пероксидазної активності (Knp), органічна речовина ґрунту, солома.

Movchan I.P., Bunas A.A., Sherstoboieva O.V. The effect of biodestructors of plant residues on the enzymatic activity of soil

One of the key factors contributing to agroecosystem degradation is the excessive accumulation of plant residues on the soil surface, combined with a decline in the metabolic activity of soil microbiota. This leads to the deterioration of soil physical properties, disruption of soil-forming processes and organic matter transformation in agroecosystems, and an increased

risk of phytopathogenic microorganisms development, which accumulate in plant debris and soil. These challenges highlight the need to revise traditional agricultural practices and promote the ecological intensification of farming systems, including the use of biodestructors.

The aim of the study was to assess the efficiency of wheat straw decomposition under the action of biodestructors Polymix, MicoCell, and their combination with ammonium nitrate under laboratory conditions by measuring soil enzymatic activity. The object of the research was typical chernozem, to which chopped straw and biological preparations were added in various combinations. The study evaluated changes in straw mass, levels of urease, polyphenol oxidase, and peroxidase activities, and calculated enzymatic indices (Kpp and If).

The results showed that the combined application of Polymix and MicoCell resulted in the highest urease activity (4.0 mg N-NH₄/g/h) and a 23.2% reduction in straw mass compared to the control. Polyphenol oxidase and peroxidase activities in this variant increased by 6.4 and 3.5 times, respectively. The calculated indices If (1.97) and Kpp (1.08) indicated the intensification of aerobic oxidative-reductive processes in the soil.

Thus, soil enzymatic activity is a sensitive indicator of the efficiency of organic residue mineralization and a marker of microbial biological activity under the influence of biopreparations, which supports the feasibility of their integration into sustainable agriculture technologies.

Key words: peroxidase, polyphenol oxidase, urease, biodestructors, soil, enzymatic redox activity index (ERI), polyphenol oxidase-peroxidase activity coefficient (POC), soil organic matter, straw.

Постановка проблеми. У сучасних умовах глобальних викликів зміни клімату, деградації ґрунтів та зниження родючості виникає необхідність переосмислення технологій ведення сільського господарства. Одним із ключових чинників деградації агроландшафтів є накопичення пожнивних решток і зниження активності ґрунтової мікробіоти, що призводить до зменшення вмісту гумусу, погіршення структури ґрунту та зростання фітопатогенних загроз. За даними Інституту ґрунтознавства і агрохімії ім. О.Н. Соколовського [1], понад 30 % орних земель України мають тенденцію до втрати родючості, а вміст гумусу в чорноземах Правобережного Лісостепу за останні 30 років знизився з 4,5 % до 3,1–3,3 %. Одночасно, за оцінками FAO [2], щорічно у світі втрачається близько 75 млрд. т родючого ґрунту, що прямо впливає на продовольчу безпеку.

Великою проблемою для сільськогосподарських підприємств стає солома і післяякісні рештки. Особливо це актуально, якщо господарства профілюються лише на рослинництві та зосереджені на короткопільній сівозміні де виключно займаються вирощуванням кукурудзи та соняшника. Солома стає логістичною та економічною проблемою, оскільки її спалювання чи вивезення є економічно недоцільними. Рациональною та екологічно безпечною альтернативою поводження з соломою є застосування біодеструкторів. Внесення деструкторів у ґрунт сприяє збагаченню мікробіологічного угруповання корисними мікроорганізмами та продуктами їх метаболізму, відбувається пригнічення розвитку фітопатогенів і сапрофітів. Вивільнений вуглець соломи включається в основні ґрунтотвірні процеси синтезу гумінових та фульвокислот.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У біосфері, азотний та вуглецевий цикли є ключовими у біогеохімічних ланцюгах органічних елементів, які дозволяє здійснювати трансформацію органічних сполук між → атмосферою.

За експертними оцінками, глобальне виробництво органічних залишків у агро-екосистемах оцінюється в 3,8 мільярда тонн на рік, де 74 % від зернових культур, 10 % – від цукрових рослин, 8 % – від бобових, 5 % – від бульб та 3 % – від олійних культур [3]. Відомо, що близько 75–80 % органічної речовини, яка щорічно потрапляє в ґрунт (органічні добрива, рослинні та тваринні рештки), проходить процеси мінералізації і лише 20–25 % їх трансформується в нові стабільні органічні сполуки [4–6]. Доведено, що заорювання соломи та інших органічних решток

у ґрунт упродовж 7–8 років підвищує вміст гумусу в дерново-підзолистому ґрунті на 0,24 %, південному чорноземі – на 0,2 % [7, 8].

Одним з індикаторів біологічного «здоров'я» ґрунту, який дозволяє охарактеризувати ступінь трансформації органічної речовини, засвоєння поживних речовин є ферментативна активність. Основні ферменти, які дозволяють оцінити деструкцію органічних речовин у ґрунті є уреаза, поліфенолоксидаза, пероксидаза.

Показник уреазної активності ґрунту є індикатором здатності до розкладання сечовини, яка є основою рослинних залишків, добрив, гною і т.д. Уреаза у своєму активному центрі містить йони нікелю (Ni^{2+}), найчастіше цей фермент синтезують мікроорганізми родів *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Proteus*, *Rhizobium*, *Streptomyces* та ін. [9, 10]. Оцінювання уреазної активності в поєднанні з іншими ферментативними показниками (β -глюкозидаза, фосфатаза, пероксидаза, поліфенолоксидази, протеази) є основою біоіндикації ґрунтів; моніторингових досліджень, що дозволяє спрогнозувати динаміку циклу азоту, визначати ризики втрат та інше [11]. За даними українських дослідників [12] застосування препаратів на основі мікроорганізмів родів *Bacillus* і *Trichoderma* підвищує уреазну активність ґрунту на 30–60 % відносно контролю. Внесення біодеструкторів у агроценоз, сприяло зростанню уреазної активності в 1,5–3 рази [13]. Інший експеримент показав, що в макроагрегатах за умови внесення компосту активність уреази підвищувалась на 22–39 % порівняно з контролем, що сприяло формуванню більш стабільних органічних фракцій і покращенню водоутримуючої здатності структури ґрунту [14].

Як поліфенолоксидаза так і пероксидаза відносяться до класу оксидоредуктаз, які каталізують окиснення фенольних сполук, зокрема лігніну, основного і найбільш стійкого компоненту рослинних решток. Саме поліфенолоксидаза і пероксидаза є ключовими при деструкції органічних речовин та формуванні стабільних гумусових структур у ґрунті. Мікроорганізми родів *Trichoderma*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Streptomyces* та ін., активізує ферментативні процеси у ґрунті, завдяки цьому підвищується швидкість мінералізації органіки та включення вуглецю до гумусових фракцій ґрунту. Згідно з дослідженнями [7, 8], при регулярному внесенні біодеструкторів і органічних залишків у ґрунт, активність ПФО і ПО збільшується в 1,5–2,3 рази, що корелює з підвищенням вмісту гумусу.

Дослідження Leaseburg [15] показало, що внесення органічних добрив, таких як компост та гній значно підвищувало активність пероксидази, поліфенолоксидази, уреази. Автори встановили позитивну кореляцію між активністю ферментів і швидкістю мінералізації азоту, що дозволяє вважати ці ферменти біохімічними маркерами ефективності деструкції органічної речовини. Найвищі значення поліфенолоксидази і пероксидази спостерігались у варіантах із внесенням сидератів та гною, що містили лігноцелюлозні субстрати.

Отже виходячи з вище викладеного оцінювання ферментативної активності ґрунту при застосуванні біодеструкторів набуває актуального значення як для прогнозування стану ґрунту в умовах змін клімату та деградації ґрунтових ресурсів, інтенсифікації процесів трансформації органічних решток так і виявлення функціональності штучносформованих мікробіомів під дією інтродукованих мікроорганізмів.

Постановка завдання. Мета дослідження – визначити ефективність розкладання соломи та ферментативну активність ґрунту при застосуванні біодеструкторів у контрольованих умовах. Лабораторний дослід проведено у відділі агроєкології і біобезпеки, Інституту агроєкології і природокористування НААН.

Тривалість дослідів складала 60 діб з наступними варіантами:

1. контроль – стерильна вода;
2. аміачна селітра (АС) – добриво вносили в нормі 10 кг/га
3. Polymix (бактеріальний деструктор, 1 кг/га) + АС;
4. MicoCell (мікроміцетний деструктор, 1 кг/га) + АС;
5. Polymix + MicoCell + АС.

Дослід проводився у пластикових ємностях, маса ґрунту – 5 кг на 1 повторення. Ґрунт – чорнозем типовий, $pH_{\text{сол}}$ – 6,7, вміст гумусу – 4,2 %. В якості джерела органічної речовини використовували подрібнену пшеничну солому в нормі 20 г/кг ґрунту. Ґрунт зволожували стерильною водою до 40-45 %, ємності накривали скляними пластинами, температура – 20–22 С.

У зразках ґрунту перед закладанням дослідів та через 60 діб культивування визначали: $pH_{\text{сол}}$, вміст гумусу [16]; масу соломи ваговим методом; поліфенолоксидазну, пероксидазну та уреазну активність ґрунту фотоколориметрично [17].

На основі ферментативних активностей розраховували [18]:

• *ферментативний індекс окисно-відновлювальної активності* ($I\Phi = (ПФО+ПО)/2$) – це інтегральний показник інтенсивності аеробних мікробіологічних процесів, які пов'язані з окисненням органічних решток, мінералізацією вуглецю та азоту та функціонуванням гумусового циклу. Високий індекс свідчить про активну деструкцію органічної речовини під дією мікробіому, низький – вказує на пригнічення окисних процесів і домінування анаеробних процесів, відповідно і зниження біодеструкції;

• *коефіцієнт поліфенолоксидазно-пероксидазної активності* ($K_{пп} = (ПФО/ПО)$), який дозволяє оцінити окисдазивну активність ґрунту, що відповідає за окиснення лігніну, поліфенолів, флаванолів і гумінових речовин. Даний показник дозволяє оцінити спрямованість процесів гумусоутворення та здатність ґрунту до окиснення фенольних сполук та їх полімерізації.

Математико-статистичне оброблення отриманих результатів проводили за допомогою стандартних комп'ютерних програм Statistica та Microsoft Excel.

Виклад основного матеріалу досліджень. Результати лабораторного дослідження впливу біодеструкторів на агрохімічні показники та ферментативну активність ґрунту представлено в таблиці 1 та 2.

Аналіз ґрунту на 60 добу після внесення деструкторів не виявив змін у вмісті гумусу. Незмінне значення гумусу (4,2 %) при застосуванні біодеструкторів найвірогідніше пов'язане з коротким терміном лабораторного експерименту.

Таблиця 1

Агрохімічні показники ґрунту при застосуванні біодеструкторів

Варіант	Маса соломи, г	$pH_{\text{сол}}$	Вміст гумусу, %
Зразок ґрунту до закладання дослідів	20	6,7	4,2
Контроль	18,95±1,29	6,68	4,2
Аміачна селітра (АС)	17,76±1,12	6,72	4,2
Polymix+АС	15,71±1,12	6,71	4,2
MicoCell+АС	15,46±1,17	6,76	4,2
Polymix+MicoCell+АС	15,37±1,11	6,74	4,2

Наше твердження узгоджується з опублікованими результатами дослідження [8, 14], що істотне зростання гумусового горизонту спостерігається лише за багаторічного

систематичного внесення біопрепаратів, зокрема при використанні органо-мінеральних технологій. Показники рН також були стабільними і мали незначні коливання, це пов'язане з тим, що внесення біопрепаратів, а саме життєдіяльність та метаболізм мікроорганізмів у ґрунті підтримує буферну здатність ґрунтового середовища.

У досліді визначали зміну маси внесеної у ґрунт соломи. Встановлено, що комбінування біодеструкторів з аміачною селітрою сприяє пришвидшеному розкладанню соломи з різною ефективністю, відносно контрольного варіанту та монозастосування аміачної селітри. Виявлено, що на 60 добу дослідження, поєднання біодеструкторів Polymix та MicoCell сприяли конверсії внесеної соломи на 23,2 % (маса соломи становила 15,37 г) відносно контролю досліді (18,95 г). Застосування бактеріального деструктора Polymix сприяло деструкції соломи на 20% відносно контрольного варіанту, а грибового деструктора MicoCell на 22,6 %.

Визначення ферментативної активностей (уреаза, поліфенолооксидаза, пероксидаза) ґрунту показало зростання досліджуваних показників у варіантах де застосовували біопрепарати та їх комбінацію порівняно з контролем (табл. 2).

Таблиця 2

Ферментативна активність ґрунту при застосуванні біодеструкторів

Варіант	Уреазна активність, мг N-NH ₄ /г/год	Поліфенолоксидаза, мг*г-1*год-1	Пероксидаза, мг*г-1*год-1	Кпп	Іф
Зразок ґрунту до закладання досліді	0,88±0,027	0,3±0,02	0,42±0,02	0,71	0,36
Контроль	1,1±0,036	0,32±0,02	0,54±0,02	0,59	0,43
Аміачна селітра (AC)	1,9±0,042	0,84±0,05	0,88±0,06	0,95	0,86
Polymix+AC	2,8±0,04	1,76±0,1	1,69±0,1	1,04	1,73
MicoCell+AC	3,4±0,047	1,85±0,12	1,74±0,1	1,06	1,8
Polymix+MicoCell+AC	4±0,061	2,04±0,12	1,89±0,12	1,08	1,97

У варіанті де застосовували аміачну селітру уреазна активність становила 1,9 мг N-NH₄/г/год, що в 1,7 раза вище порівняно з контролем (1,1 мг N-NH₄/г/год). Встановлено, що моно застосування біодеструкторів Polymix чи MicoCell сприяло зростанню уреазної активності ґрунту у 2,5 та 3 рази, відповідно. На нашу думку це пов'язано з мікробіологічним складом біодеструкторів та метаболічною здатністю мікроорганізмів-агентів до синтезу екзоферментів у тому числі і уреаз. Вищий рівень уреазної активності у варіанті де застосовували MicoCell, найвірогідніше пов'язаний з активністю мікроміцетів, які входять у склад біодеструктора. Вважаємо, що мікроміцети порівняно з бактеріями краще колонізують внесену соломку та ефективніше її мінералізують. Це твердження підтверджують результати отримані у варіанті де застосовували аміачну селітру, рівень уреазу був найнижчий. Найвищий рівень уреазної активності, 4,0 мг N-NH₄/г/год, що перевищує контроль у 3,6 рази, відмічали при застосуванні Polymix в поєднанні з MicoCell. На нашу думку, це пов'язано з ефективністю мікробіоценозу, який утворюється за інтродукції бактерій та мікроміцетів. Вважаємо, що утворенні мікробні угруповання володіють синергічним ефектом, що дозволяє забезпечити повну деградацію органічних залишків. Наші дані узгоджуються з даними Llado та ін. [19], котрий наголошує, що синергічний ефект мікробного угруповання може бути зумовлений також поліпшенням трофічних зв'язків між мікроорганізмами та підвищенням сумарної біомаси ґрунтової мікрофлори.

Подібні закономірності прослідковуються при визначенні поліфенолоксидазної та пероксидазної активностей. Саме активність цих ферментів відображають обсяг окислювально-відновних процесів у ґрунті і є маркерами біохімічного перетворення органічних залишків. Внесення аміачної селітри спричиняло зростання поліфенолоксидази у 2,6 рази ($0,84 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$), а вміст поліфенолоксидази зростав у 1,6 рази ($0,88 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$) порівняно з контрольним варіантом. Найвищі показники поліфенолоксидазної активності зафіксовані у варіантах де застосовували MicoCell – $1,85 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ та комбінували Polymix з MicoCell – $2,04 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$. Значення поліфенолоксидазної активності для даних варіантів був у 5,8 та 6,4 рази відповідно вище, показника контрольного варіанту (поліфенолоксидаза складала – $0,32 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$). Пероксидазна активність у варіантах де застосовувались деструктори зростала понад як у 3 рази порівняно з контролем та понад як у 4 рази відносно ґрунту до закладання досліду. Зафіксовано максимальне значення пероксидазної активності у варіанті де поєднували застосування Polymix та MicoCell – $1,89 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$, що у 3,5 рази вище пероксидази у контрольному варіанті.

Розрахований ферментативний індекс окисно-відновлювальної активності для досліджуваних варіантів коливався в межах 0,59 – 1,08. У контрольних варіантах (ґрунт у досліді, але без внесення речовин, які сприяють деструкції органіки і ґрунт до початку досліду) показник Кпп становив 0,59 і 0,71, відповідно. Отже у зразках ґрунту контрольних варіантів домінувала пероксидазна активність. Така тенденція характерна для ґрунтів з уповільненими процесами деградації органіки, зокрема лігніну, що може бути пов'язано із низькою мікробною активністю або обмеженою доступністю фенольних субстратів. У дослідних варіантах де застосовували біодеструктори, показники Кпп фіксували у межах 1,04–1,08, що свідчить про активацію поліфенолоксидазної активності. Це, у свою чергу, вказує на інтенсифікацію процесів окиснення фенольних і лігноцелюлозних сполук – важливих стадій у трансформації органічної речовини в стабільні гумусоподібні структури. Переважання РРО-активності також відображає посилення ролі аеробної мікробіоти (зокрема, бактерій роду *Pseudomonas* та грибів *Trichoderma*), які здатні продукувати оксидазні ферменти та входять до складу досліджуваних деструкторів.

Розрахований ферментативний індекс (Іф) фіксували у межах 0,36 (зразок ґрунту до початку досліду), 0,43 – контролю і до 1,97 для досліджуваних варіантів. Отже розрахований Іф свідчить про підвищення сумарної окисно-відновної ферментативної активності ґрунту досліджуваних варіантів. Відповідно, встановлений Іф свідчить про активну мобілізацію вуглецю та азоту в ґрунті досліду, що підтверджується інтенсивним розкладанням органічних решток.

Висновки. Отже, отримані результати дослідження доводять що ферментативна активність ґрунту є функціональним показником результативності конверсії органічних решток та маркером стану сформовано мікробіому під впливом застосованих біодеструкторів. Внесення біодеструкторів Polimix, MicoCell, та їх поєднання значно активізує мікробіологічні та ферментативні процеси в ґрунті, сприяє інтенсивнішому розкладу соломи, покращує азотний обмін і загалом є ефективною біотехнологічною практикою для прискореної мінералізації рослинних решток у агроєкосистемах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Лактіонова Т. М., Бігун О. М., Шейко С. М., Накісько С. Г. Реєстр еталонних фізичних параметрів орних ґрунтів України і рекомендації щодо оцінювання фізичної якості ґрунту. Харків: ТОВ «Смугаста типографія», 2016. 44 с.

2. FAO. The future of food and agriculture – Drivers and triggers for transformation. 2022. № 3, 444. <https://doi.org/10.4060/cc0959en>
3. Копилов Є. П., Шаховніна О. О., Надкернична, О. В., Новікова Т. П., Тарасов, В. В. Мікроміцети кореневої зони рослин сої культурної та їхня функціональна дія на рослини. *Сільськогосподарська мікробіологія*. 2022. № 36. С. 13-27. <https://doi.org/10.35868/1997-3004.36.13-27>
4. Pysarenko V., Pischalenko M., Chaika T., Lohvynenko V., Krupska N., Koroleviat Y., Kirieiev Y. The impact of bio-stimulators on zucchini plants under pre-sowing seed treatment. *Scientific Progress & Innovations*. 2023. № 26 (4). P. 9-13. doi: 10.31210/spi2023.26.04.02
5. Grzyb A., Wolna-Maruwka A., Niewiadomska A. Environmental Factors Affecting the Mineralization of Crop Residues. *Agronomy*. 2020. № 10 (12). <https://doi.org/10.3390/agronomy10121951>
6. Chen, M., Li, Q., Liu, C., Meng, E., & Zhang, B. Microbial Degradation of Lignocellulose for Sustainable Biomass Utilization and Future Research Perspectives. *Sustainability*. 2025. № 17(9), 4223. <https://doi.org/10.3390/su17094223>
7. Rowinska P., Gutarowska B., Janas R., Szulc J. Biopreparations for the decomposition of crop residues. *Microbial Biotechnology*. 2024. V. 17. Is. 8. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.14534>
8. Гадзало Я. М., Вожегова Р. А., Лікар Я. О. Ефективність застосування мікробних препаратів деструкторів на рослинних рештках у процесі їх мінералізації після збирання. *Аграрні інновації*. 2023. № 19. С. 24-33. DOI: <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2023.19.4>
9. Mobley H., Hausinger R. Microbial ureases: significance, regulation, and molecular characterization. *Microbiol. Rev.* 1989. V. 53 (1). P. 85-108. <https://doi.org/10.1128/mr.53.1.85-108.1989>
10. Carter E., Flugga N., Boer J., Mulrooney S., Hausinger R. Interplay of metal ions and urease. *J. Biol. Chem.* 2009. V. 284 (13). P. 8321-8329. <https://doi.org/10.1074/jbc.M809731200>
11. Demyanyuk O. S., Patyka V. P., Sherstoboeva O. V., Bunas, A. A. Formation of the structure of microbiocenoses of soils of agroecosystems depending on trophic and hydrothermal factors. *Biosystems Diversity*. 2018. V. 26(2). P. 103-110. doi:10.15421/01181
12. Ситник І. М., Гусарова Л. І. Деструкція рослинних решток і ферментативна активність ґрунту за дії біопрепаратів. *Ґрунтознавство*. 2021. № 22(3). С. 45-52.
13. Zhao R., Liu J., Xu N., He T., Meng J., Liu Z. Urea hydrolysis in different farmland soils as affected by long-term biochar application. *Front. Environ. Sci.* 2022. 10:950482. doi: 10.3389/fenvs.2022.950482
14. Chaves B., Redin M., Giacomini S.-J., Schmatz R., Leonard J., Ferchaud F., Recous S. The combination of residue quality, residue placement and soil mineral N content drives C and N dynamics by modifying N availability to microbial decomposers. *Soil Biology and Biochemistry*. 2021. V. 163. 108434. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108434>
15. Leaseburg E. E., Lei L., Fink L. S. Effects of Organic Amendments on Phenol Oxidase, Peroxidase, Urease, and Nitrogen Mineralization: A Laboratory Incubation Study. *Agrochemicals*. 2022. № 1 (1). P. 3-16. <https://doi.org/10.3390/agrochemicals1010002>
16. Агрохімічний аналіз : підручник / М.М. Городній, А.П. Лісовал, А.В. Бикин та ін. / За ред. М.М. Городнього, 2-е видання. Київ : Арістей, 2005. 476 с.
17. Методи біологічних та агрохімічних досліджень рослин і ґрунтів. Грицаєнко З.М., Грицаєнко А.О., Карпенко В.П. / – К.: ЗАТ «НІЧЛА-БА», 2003. 320 с.
18. Kuncheva G., Ivanova I., Gynchev G. Soil peroxidase and polyphenoloxidase activity under soil conservation practices on sloping terrains. *BIO Web of Conferences*. 2024. № 122, 01018. C. 2-8. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202412201018>
19. Llado, S., Lopez-Mondejar, R., Baldrian, P. Forest soil bacteria: diversity, involvement in ecosystem processes, and response to global change. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*. 2017. № 81(2), e00063-16. <https://doi.org/10.1128/MMBR.00063-16>