



УДК 633.15:632.954:577.15

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.16.2026.3>

ЕКОТОКСИКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ФЕРМЕНТАТИВНИХ РЕАКЦІЙ КУКУРУДЗИ ЗА СУМІСНОГО ЗАСТОСУВАННЯ ГЕРБІЦИДУ ТА БІОПРЕПАРАТУ

О. І. Заболотний¹

Тривале використання високих норм мінеральних добрив та пестицидів різного спектру викликає зміни біологічної рівноваги в агрокосистемах. Це, у свою чергу, викликає зниження природної родючості ґрунтів та погіршення адаптивного потенціалу культурних рослин, закладених природою та селекцією. Тому запровадження елементів екологізації технологій вирощування польових культур, зокрема використання різноманітних біопрепаратів, і подальший перехід до повної екологізації рослинництва стає стратегічною необхідністю для забезпечення продовольчої безпеки країни.

Провідне місце в оцінці ефективності впливу різноманітних біоагентів посідає вивчення ензиматичного апарату рослини. Відомо, що ферментативна активність виступає найшвидшим і найбільш точним біомаркером фізіологічного стану рослинного організму, відображаючи зміни в обміні речовин ще до появи візуальних морфологічних ознак. Дослідження впливу сучасних біопрепаратів на активність ключових ферментів є фундаментальним завданням для розробки високо-ефективних та екологічно безпечних технологій вирощування сільськогосподарських культур.

Виявлено, що застосування гербіциду Рініді, в.г. викликає двофазну реакцію антиоксидантної ферментної системи рослин кукурудзи: первинну мобілізацію захисних ферментів на 3-тю добу та їхнє подальше виснаження за визначення на 10-ту добу. У варіантах досліду із застосуванням лише гербіциду без біопрепарату це проявляється у критичному падінні активності каталази на 30% відносно початкового сплеску, що супроводжується сталим зростанням рівня пероксидази та поліфенолоксидази. Такий дисбаланс свідчить про перехід оксидативного стресу у хронічну фазу, інтенсивність якої прямо пропорційна нормі внесення гербіциду.

Включення до бакової суміші біопрепарату Egrow певною мірою нівелює фітотоксичний вплив гербіциду, трансформуючи напрям захисних реакцій від деструкції в репарації. Біоагент забезпечує тривалу стабілізацію каталазної активності та прискорену нормалізацію рівня інших окиснювальних ферментів. Таким чином, введення до бакової суміші біопрепарату Egrow є ефективним механізмом екологізації інтенсивного рослинництва, оскільки дає змогу підтримувати фізіологічну стійкість агро-екоценозу та мінімізувати негативні наслідки пестицидного навантаження на довкілля.

Ключові слова: екологізація, ензими, каталаза, пероксидаза, поліфенолоксидаза, активність, Рініді, Egrow.

¹ кандидат сільськогосподарських наук,
доцент кафедри агробіології та біохімії
(Уманський національний університет, м. Умань)
e-mail: aleks.zabolotnyi@gmail.com
ORCID: 0000-0003-0069-1617

ECOTOXICOLOGICAL ASSESSMENT OF ENZYMATIC REACTIONS OF MAIZE UNDER THE APPLICATION OF HERBICIDE AND BIOPREPARATION

O. I. Zabolotnyi

The prolonged use of high levels of mineral fertilizers and pesticides of various types causes changes in the biological balance of agroecosystems. This, in turn, leads to a decrease in the natural fertility of soils and a deterioration in the adaptive potential of cultivated plants, which is determined by nature and selection. Therefore, the introduction of elements of greening in field crop cultivation technologies, in particular the use of various biological products, and the subsequent transition to fully green crop production is becoming a strategic necessity to ensure the country's food security.

The study of the enzymatic apparatus of plants plays a leading role in assessing the effectiveness of various bioagents. It is known that enzymatic activity is the fastest and most accurate biomarker of the physiological state of a plant organism, reflecting changes in metabolism even before the appearance of visual morphological signs. Research into the effect of modern biological products on the activity of key enzymes is a fundamental task for the development of highly efficient and environmentally safe technologies for growing agricultural crops.

It was found that the use of the herbicide Rinidi, u.g. causes a two-phase reaction of the antioxidant enzyme system of corn plants: primary mobilization of protective enzymes on the 3rd day and their subsequent depletion by the 10th day. In the experimental variants using only the herbicide without the biological product, this manifests itself in a critical drop in catalase activity by 30% relative to the initial surge, accompanied by a steady increase in the level of peroxidase and polyphenol oxidase. This imbalance indicates a transition of oxidative stress to a chronic phase, the intensity of which is directly proportional to the rate of herbicide application.

The inclusion of the Egrow biological product in the tank mixture to a certain extent neutralizes the phytotoxic effect of the herbicide, transforming the direction of protective reactions from destruction to repair. The biological agent provides long-term stabilization of catalase activity and accelerated normalization of the level of other oxidative enzymes. Thus, the addition of the Egrow biological product to the tank mixture is an effective mechanism for greening intensive crop production, as it allows maintaining the physiological stability of the agroecosystem and minimizing the negative effects of pesticide load on the environment.

Key words: greening, enzymes, catalase, peroxidase, polyphenol oxidase, activity, Rinidi, Egrow.

Вступ

Сучасний розвиток світового агропромислового комплексу базується на принципах сталого розвитку та інтенсивної екологізації технологічних процесів, адже довготривале використання синтетичних мінеральних добрив та пестицидів різного спектру дії призвело до змін біологічної рівноваги в агроєкосистемах. Ці зміни, у свою чергу, викликають зниження природної родючості ґрунтів та погіршення адаптивного потенціалу культурних рослин, закладених природою та селекцією. Тому запровадження елементів екологізації технологій вирощування польових культур і, у перспективі, перехід до повної екологізації рослинництва розглядається не просто як альтернатива, а як стратегічна необхідність для забезпечення продовольчої безпеки (Амонс і Красняк, 2023; Ortega et al., 2024).

Поряд з цим, зростаючий вплив різноманітних абіотичних стресових чинників на продуктивність сільськогосподарських культур вимагає інноваційних стратегій для забезпечення сталого розвитку аграр-

ного виробництва. Перспективність застосування біологічних препаратів різного походження полягає у пом'якшенні негативного впливу абіотичних чинників на сільськогосподарські культури. Біоагенти, починаючи від простих органічних сполук і закінчуючи складними живими мікроорганізмами, демонструють значний потенціал у підвищенні стійкості рослин, толерантності до стресу та загальної продуктивності (Alharby et al., 2020; Bhupenchandra et al., 2022; Di Sario et al., 2025).

Крім цього, інтеграція у технології вирощування польових культур біологічних препаратів, як елементів екологізації, є ключовим інструментом мінімізації антропогенного впливу на довкілля. Використання різноманітних біоагентів, зокрема й мікробних консорціумів, дає змогу відновити екологічний баланс агроєколандшафтів. Біопрепарати відіграють роль «м'яких» рістрегуляторів, які замість безпосереднього впливу чи штучного стимулювання росту активізують внутрішній генетичний та фізіологічний потенціал самої рослини (Rouphael & Colla, 2020; Vassileva et al., 2020).

Важливість біологічних препаратів також зумовлена необхідністю відновлення мікробіому ризосфери, який виступає посередником між ґрунтом та рослинним організмом ризосфери, адже біологізація вирощування сільськогосподарських культур сприяє регенерації ґрунтової біоти, що безпосередньо впливає на активність ензимів рослин через сигнальні системи Quorum Sensing. Це створює замкнений цикл саморегуляції, де біопрепарати виступають тригером для запуску системної стійкості та оптимізації метаболізму поживних речовин (Khan et al., 2019; Ozhuner, 2025).

Провідне місце в оцінці ефективності впливу різноманітних біоагентів посідає вивчення ензиматичного апарату рослини. Відомо, що ферментативна активність виступає найшвидшим і найбільш точним біомаркером фізіологічного стану рослинного організму, відображаючи зміни в обміні речовин ще до появи візуальних морфологічних ознак. Дослідження впливу сучасних біопрепаратів на активність ключових ферментів є фундаментальним завданням для розробки високоєфективних та екологічно безпечних технологій вирощування сільськогосподарських культур. Встановлено, що біопрепарати, зокрема мікробіологічного походження, підвищують активність супероксиддисмутази (SOD) та каталази (CAT), що дозволяє рослинам ефективно нейтралізувати активні форми кисню за дії різноманітних стресових чинників (Mahmudul et al., 2021; Nan et al., 2025).

Відомо, що одним із механізмів захисту рослинних клітин є функціонування антиоксидантної системи за участі ферментативних та неферментативних компонентів, які підтримують окисний гомеостаз. Додаткове утворення АФК за умов дії різних стресових чинників посилює вплив прооксидантної ланки у житті рослин (Россихіна-Галича та ін., 2013).

Вітчизняними дослідниками при вивченні фізіолого-біохімічних механізмів інтегрованої дії хімічних стресорів і біопрепаратів встановлено, що із збільшенням норм застосування гербіцидів без біопрепаратів у рослинах ячменю ярого на 3-тю добу простежується інтенсифікація генерування активних форм кисню (АФК), що сприяє розвитку у рослин оксидативного стресу, наслідком якого є підвищений рівень пероксидного окиснення ліпідів (ПОЛ). На 10-ту добу після внесення препаратів рівень ПОЛ у рослинах ячменю ярого продовжував зростати, що

пов'язано з активізацією ростових та обмінних процесів, невід'ємним продуктом яких є АФК. Проте у варіантах досліду, де гербіциди застосовували сумісно з біопрепаратом, рівень ПОЛ за визначення на 10-ту добу знижувався порівняно з варіантами досліду без біоагента. Дослідники стверджують, що за сумісного внесення гербіцидів і біопрепаратів відбувається активізація антиоксидантних систем захисту рослинного організму, завдяки яким знижується негативний вплив на клітини продуктів метаболізму гербіцидів (Карпенко та ін., 2016).

Іншими дослідженнями встановлено, що активність ферменту глутатіон-S-трансферази (GST) зростає у відповідь на застосування гербіциду, що є частиною захисної системи рослини, спрямованої на детоксикацію токсичних сполук та нейтралізацію активних форм кисню. Проте за умов комплексного застосування препаратів (гербіцид + біопрепарат, особливо на фоні передпосівної обробки) спостерігається зниження активності GST на 10-й день, що свідчить про стабілізацію процесів детоксикації та зменшення рівня окислювального стресу (зниження вмісту MDA). Автори також зазначають, що відповідно до отриманих результатів їх досліджень, комплексна дія хімічного стресора та біоагента також підвищує активність інших антиоксидантних ферментів, таких як пероксидаза та каталаза на 19–33%), що підтверджує загальну активізацію системи захисту рослин за використання біопрепаратів на фоні впливу стресового чинника (Karpenko et al., 2019).

Дослідженнями, проведеними на рослинах вівса голозерного, виявлено, що найвищу активність каталази у листках культури було відмічено за використання для передпосівної обробки насіння суміші біологічних препаратів Меланоріз та Агролайт за наступного обприскування рослин Агролайтом, що забезпечило підвищення активності даного ферменту на 31–48% відповідно до варіантів із окремим внесенням Меланорізу. Стосовно пероксидази та поліфенолоксидази, то відмічено аналогічну залежність їх активності від норм та способів застосування біоагентів. Зростання активності досліджуваних антиоксидантних ферментів за комплексного застосування біопрепаратів є наслідком покращення умов росту й розвитку культури, за яких зростає активність обмінних процесів у рослинах, головною складовою яких виступають саме фер-

менти. Поряд з цим, зростання активності окисно-відновних ферментів може засвідчувати пряму дію досліджуваних біоагентів на стан антиоксидантної системи культури, яка активується у відповідь на вплив екзогенних складових препаратів, які володіють рістстимулювальною здатністю (Карпенко & Марченко, 2020).

Зважаючи на вищенаведене, завданням досліджень було виявити зміни у активності ключових ферментів класу оксидоредуктаз, що входять до складу антиоксидантних систем рослинного організму.

Матеріал і методи

Дослідження з цієї тематики проводили впродовж 2024–2025 рр. у польових та лабораторних умовах кафедри біології Уманського НУ. Об'єктом дослідження став гібрид кукурудзи Амарок 290.

Схема досліду включала контроль – обробка вегетуючих рослин водою (200 л/га), варіанти із застосуванням гербіциду Рініді, в.г. у нормах 250, 350 і 450 г/га як окремо, так і у баковій суміші з регулятором росту Egrow (0,5 л/га). Обробку рослин по вегетації виконували у фазі 3–5 листків розвитку культури з витратою робочого розчину 200 л/га, повторність досліду – чотириразова із систематичним розміщенням варіантів.

Схема досліду: 1. Контроль (обробка водою); 2. Рініді, в.г. 250 г/га; 3. Рініді, в.г. 350 г/га; 4. Рініді, в.г. 450 г/га; 5. Рініді, в.г. 250 г/га + Egrow 0,5 л/га; 6. Рініді, в.г. 350 г/га + Egrow 0,5 л/га; 7. Рініді, в.г. 450 г/га + Egrow 0,5 л/га.

Ґрунт дослідного поля: чорнозем опідзолений (гумус – 3,5 %, рН – 6,2). Забезпеченість рухомим фосфором (88 мг/кг) та калієм (132 мг/кг) – за методом Чирикова; легкогідролізованим азотом (103 мг/кг) – за Корнфілдом. Активність каталази (КАТ, КФ 1.11.1.6), мкМоль розкладеного H_2O_2 /г сирової речовини за 1 хв; пероксидази (ПОД, КФ 1.11.1.7) мкМоль окисненого гваяколу/г сирової речовини за 1 хв. та поліфенолоксидази (ПФО, КФ 1.14.18.1) мкМоль окисненої аскорбінової кислоти/г сирової речовини за 1 хв. визначали у відповідності до методик, описаних Ю. Г. Приседським (Приседський, 2022). З метою оцінки впливу гербіциду та регулятора росту на формування активності антиоксидантних ферментів використано однофакторний дисперсійний аналіз. Статистичні розрахунки виконувалися з використанням пакету статистичного аналізу програмного забезпечення MS Excel.

Результати

Аналіз динаміки ферментативної активності свідчить, що внесення норм гербіциду Рініді, в.г. спричиняє розвиток системного оксидативного стресу, інтенсивність якого перебуває у прямій залежності від норми препарату та тривалості експозиції. Так, на 3-тю добу після обприскування посівів кукурудзи спостерігається фаза первинної мобілізації, що характеризується синхронним зростанням активності всіх досліджуваних ферментів. За використання мінімальної норми гербіциду у 250 г/га активність каталази зростає до 96,2 мкМоль (+19,8% до контролю), пероксидази – до 133,3 мкМоль (+18,7% до контролю), а поліфенолоксидази – до 23,6 мкМоль (+16,3% до контролю) (рис. 1).

Зі збільшенням норми гербіциду до 350 г/га активність каталази сягає 100,3 мкМоль, а пероксидази – 141,6 мкМоль. Максимальна інтенсивність захисних реакцій зафіксована при нормі Рініді, в.г. у 450 г/га, де показники ферментної активності зросли на 31,1–36,6% порівняно з контролем залежно від ферменту. Такий сплеск є класичною реакцією так званої «термінової адаптації», спрямованої на нейтралізацію пероксиду водню (H_2O_2) та детоксикацію ксенобіотиків.

На 10-ту добу у варіантах досліду із застосуванням лише гербіциду зміна ферментативної активності засвідчує, що спрямованість біохімічних процесів радикально змінюється і вказує на виснаження захисних ресурсів, якими в першу чергу виступає фермент каталаза. Так, зокрема, при нормі гербіциду у 250 г/га активність каталази знижується до 88,4 мкМоль, що на 8,1% менше за її показник на 3-тю добу (рис. 2).

При нормі у 350 г/га активність ферменту наближається до рівня контролю – (80,1 мкМоль, а за максимальної норми у 450 г/га сягає критичної позначки у 72,2 мкМоль, що на 10,1% нижче за контроль. Поряд з цим активність пероксидази демонструє тенденцію до зростання від 148,2 мкМоль (250 г/га гербіциду) до пікових 185,1 мкМоль (450 г/га гербіциду), що на 73,4% перевищує контрольний варіант досліду. Аналогічна тенденція спостерігається і при визначенні активності поліфенолоксидази, активність якої зростає до 35,6 мкМоль (+89,2% до контролю). Це може свідчити про перехід стресової дії гербіциду до хронічної фази, коли за рахунок зростання активності пероксидази рослинний організм намагається компен-



Рис. 1. Зміна активності антиоксидантних ферментів у листках кукурудзи на 10-ту добу після внесення гербициду Рініді, в.г. та біопрепарату Egrow (2024-2025 рр.)

Примітка: 1. Контроль (обробка водою); 2. Рініді, в.г. 250 г/га; 3. Рініді, в.г. 350 г/га; 4. Рініді, в.г. 450 г/га; 5. Рініді, в.г. 250 г/га + Egrow 0,5 л/га; 6. Рініді, в.г. 350 г/га + Egrow 0,5 л/га; 7. Рініді, в.г. 450 г/га + Egrow 0,5 л/га

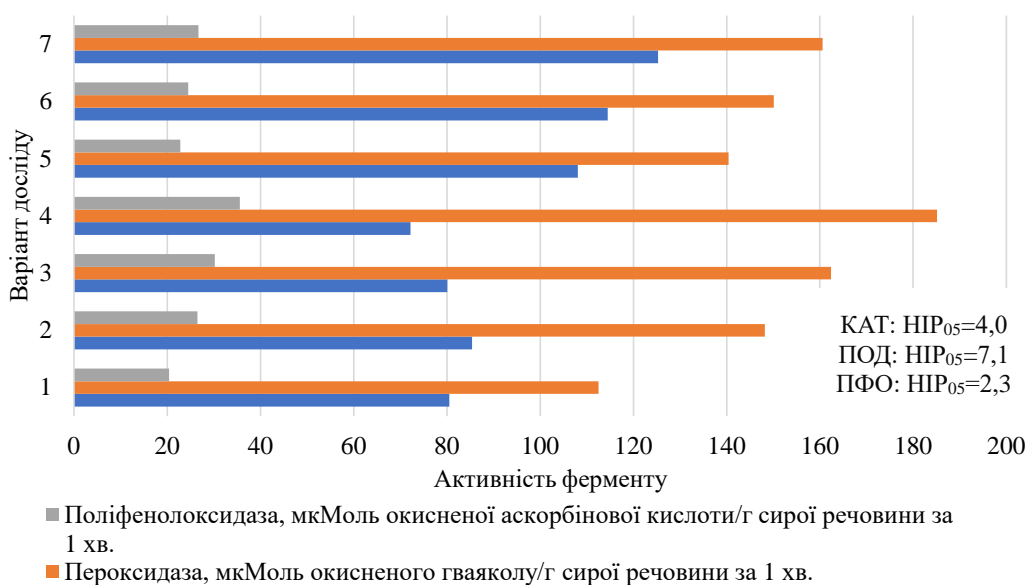


Рис. 2. Зміна активності антиоксидантних ферментів у листках кукурудзи на 10-ту добу після внесення гербициду Рініді, в.г. та біопрепарату Egrow (2024-2025 рр.)

Примітка: 1. Контроль (обробка водою); 2. Рініді, в.г. 250 г/га; 3. Рініді, в.г. 350 г/га; 4. Рініді, в.г. 450 г/га; 5. Рініді, в.г. 250 г/га + Egrow 0,5 л/га; 6. Рініді, в.г. 350 г/га + Egrow 0,5 л/га; 7. Рініді, в.г. 450 г/га + Egrow 0,5 л/га

сувати дефіцит каталази, що супроводжується посиленням процесів перекисного окиснення ліпідів та деструкцією мембран. Подібні зміни у активності антиоксидантних ферментів відмічено також й іншими дослідженнями (Li et al., 2025)

За умови сумісного застосування гербициду з біопрепаратом Egrow характер адаптаційних процесів істотно змінюється, набуваючи ознак відновлення. Вже на 3-тю добу біоагент забезпечує вищий рівень енергетичної мобілізації, що сприяє зростанню

активності каталази за сумісного внесення препаратів на 6,1–8,3% більше, ніж при внесенні аналогічних норм гербіциду без стимулятора росту. Найбільш показовою є динаміка на 10-ту добу. У варіанті досліду Рініді, в.г. 250 г/га + Egrow 0,5 л/га активність каталази зростає до 108,1 мкМоль, перевищуючи чистий гербіцидний фон у цій же нормі на 22,3%. За внесення Рініді, в.г. 350 г/га + Egrow 0,5 л/га цей показник складає 114,5 мкМоль. Максимальний антистресовий ефект зафіксовано при поєднанні 450 г/га гербіциду з біоагентом, тут активність каталази стабільно зростає до 125,3 мкМоль, що на 51,9% вище за контроль та на 73,5% перевищує показник дії цієї ж норми гербіциду без стимулятора.

Паралельно з посиленням каталазного захисту спостерігається нормалізація показників інших антиоксидантних ферментів. У всіх варіантах досліду із застосуванням гербіциду сумісно з біоагентом Egrow активність пероксидази на 10-ту добу є суттєво нижчою за показники 3-ї доби: від 140,4 мкМоль при застосуванні 250 г/га Рініді, в.г. до 160,6 мкМоль – при внесенні 450 г/га, що в середньому на 10,1–15,4% менше порівняно з фазою первинного шоку на 3-тю добу після внесення. Активність поліфенолоксидази також демонструє тенденцію зниження до 22,8–26,7 мкМоль.

Обговорення

Отримані результати дослідження свідчать про дію біопрепарату Egrow у якості метаболічного протектора, який сприяє пришвидшенню детоксикації ксенобіотика, яким у даному дослідженні є гербіцид, тим самим запобігаючи накопиченню у рослинному організмі надлишку кисневих радикалів. Таким чином, використання досліджуваного біопрепарату дає змогу спрямувати метаболізм рослини, до керованої фізіологічної адаптації, яка мінімізує пестицидний тиск на навколишнє середовище та є фундаментальним аспектом екологізації сучасного землеробства. Аналогічний вплив біологічних препаратів спостерігався й в інших дослідженнях (Hasanuzzaman et al., 2020)

Висновки

Отже, застосування гербіциду Рініді, в.г. викликає своєрідну реакцію антиоксидантної ферментної системи рослин кукурудзи: спочатку, на 3-тю добу після внесення препаратів, спостерігається мобілізація захисних ферментних систем, а на 10-ту добу спостерігається певне вичерпання їх активності. У варіантах досліду із застосуванням лише гербіциду без біопрепарату це проявляється у падінні активності каталази на 30% стосовно початкового зростання на фоні зростання рівня пероксидази та поліфенолоксидази. Це свідчить про перехід оксидативного стресу у хронічну фазу, інтенсивність якої прямо пропорційна нормі внесення гербіциду.

Включення до бакової суміші біопрепарату Egrow певною мірою пом'якшує фітотоксичний вплив гербіциду, трансформуючи напрям захисних реакцій від руйнування до відновлення. Біопрепарат забезпечує стійку стабілізацію каталазної активності та прискорену нормалізацію активності інших окиснювальних ферментів. Таким чином, введення до бакової суміші біопрепарату Egrow є ефективним механізмом екологізації інтенсивного рослинництва, оскільки дає змогу підтримувати фізіологічну стійкість агроєкоценозу та мінімізувати негативні наслідки пестицидного навантаження на довкілля.

Вивчення реакцій рослинного організму на гербіцидний стрес є перспективними, оскільки антиоксидантні системи рослин містять не лише каталазу, пероксидазу і поліфенолоксидазу, у їх функціонуванні важливу роль відіграють також супероксиддисмутаза, низькомолекулярні антиоксиданти, зокрема аскорбат, глутатіон, каротиноїди. Також важливе значення у детоксикації гербіцидів має глутатіон-S-трансфераза, що каталізує кон'югацію ксенобіотиків із відновленим глутатіоном. Активність цих компонентів визначає здатність рослини ефективно долати оксидативний стрес та зберігати фізіологічну рівновагу. Тому вивчення активності вказаних компонентів антиоксидантних систем є метою подальших досліджень.

Список використаної літератури

Амонс С., Красняк О. Екологізація аграрного виробництва як основа формування системи продовольчої безпеки України. *Економіка та суспільство*. 2023. №5. С. 48–53. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-47-41>.

Карпенко В. П., Марченко К. Ю. Активність антиоксидантних ферментів у рослинах вівса голозерного за дії мікробного препарату і регулятора росту рослин. *Збірник наукових праць Уманського НУ*. 2020. Випуск 96. Ч. 1. С. 9–23. <https://doi.org/10.31395/2415-8240-2020-96-1-9-23>

Карпенко В. П., Притуляк Р. М., Даценко А. А., Івасюк Ю. І. Фізіолого-біохімічні механізми інтегрованої дії гербіцидів і регуляторів росту рослин. *Вісник Уманського національного університету садівництва*. 2016. №1. С. 72–75.

Приседський Ю. Г. Великий практикум з фізіології та біохімії рослин (біохімічні методи досліджень). Вінниця: «ТВОРИ». 2022. 418 с.

Россихіна-Галича Г. С., Більчук В. С., Легостаєва Т. В., Шмагайло Ю. О. Дослідження стану прооксидантно-антиоксидантної системи кукурудзи за дії гербіцидного забруднення. *Вісник Львівського університету*. 2013. № 61. С. 201–207.

Alharby H. F., Alzahrani Y. M., Rady M. M. Seeds pretreatment with zeatins or maize grain-derived organic biostimulant improved hormonal contents, polyamine gene expression, and salinity and drought tolerance of wheat. *International Journal of Agriculture and Biology*. 2020. №24. P. 714–724. <https://doi.org/10.17957/IJAB/15.1491>

Bhupenchandra I., Chongtham S. K., Devi E. L., Choudhary A. K., Salam, M.D., Sahoo M. R., Khaba, C. I. Role of biostimulants in mitigating the effects of climate change on crop performance. *Frontiers in plant science*. 2022. №13. P. 967665. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.967665>

Di Sario L., Boeri P., Matus J. T., Pizzio G. A. Plant biostimulants to enhance abiotic stress resilience in crops. *International Journal of Molecular Sciences (IJMS)*. 2025. №26(3). P. 1129. <https://doi.org/10.3390/ijms26031129>.

Han L., Li Y., Li Z. M. B., Liang Y., Gao P., Zhao X. Alleviation of saline-alkaline stress in alfalfa by a consortium of plant-growth-promoting rhizobacteria. *Plants*. 2025. №14(17). P. 2744. <https://doi.org/10.3390/plants14172744>

Hasanuzzaman M., Borhannuddin Bhuyan M. H. M., Zulfiqar F., Raza, A., Mohsin, S. M., Al Mahmud J., Fujita M., Fotopoulos V. Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: revisiting the crucial role of a universal defense regulator. *Antioxidants*. 2020. №9(8). P. 681. <https://doi.org/10.3390/antiox9080681>

Li J., Qin Z., Wang L., Xin M. Advances in the metabolism and phytoremediation of pesticides in horticultural plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2025. №302. P. 118634. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118634>

Karpenko V., Pavlyshyn S., Prytuliak R., Naherniuk D. Content of malondialdehyde and activity of enzyme glutathione-S-transferase in the leaves of emmer wheat under the action of herbicide and plant growth regulator. *Agronomy Research*. 2019. №17(1). P. 144–154. <https://doi.org/10.15159/AR.19.014>

Khan M., Bhargava P., Goel R. Quorum sensing molecules of rhizobacteria: a trigger for developing systemic resistance in plants. *PGPR: Genetic Adaptation and Recent Advances*. 2019. P. 117–138. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6536-2_7

Mahmudul H., Muhammad S. A.-H., Adam M. R., Hafizuddin H. Bioherbicides: an eco-friendly tool for sustainable weed management. *Plants*. 2021. №10(6). P. 1212. <https://doi.org/10.3390/plants10061212>

Ortega R., Miralles I., Domene M. A., Meca D., del Moral F. Ecological practices increase soil fertility and microbial diversity under intensive farming. *Science of the total environment*. 2024. №954. P. 176777. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176777>

Ozhuner E. Plant growth-promoting rhizobacteria enhance essential oil production and antioxidant activity of *Mentha piperita* under water deficit stress. *Agricultural Water Management*. 2025. №321. P. 109936. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109936>

Rouphael Y., Colla G. Biostimulants in agriculture. *Frontiers in plant science*. 2020. №11. P. 40. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00040>

Vassileva M., Flor-Peregrin E., Malusá E., Vassilev N. Towards better understanding of the interactions and efficient application of plant beneficial prebiotics, probiotics, postbiotics and synbiotics. *Frontiers in plant science*. 2020. №11. P. 01068. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01068>

References

Amons, S. & Krasniak, O. (2023). Ekolohizatsiia aharnoho vyrobnytstva yak osnova formuvannia systemy prodovolchoi bezpeky Ukrainy [Ecologization of agricultural production as the basis of the formation of the food security system of Ukraine]. *Ekonomika ta suspilstvo [Economy and society]*, 5, 48–53. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-47-41> [in Ukrainian].

Karpenko, V. P. & Marchenko, K. Yu. (2020). Aktyvnist antyoksydantnykh fermentiv u roslynakh vivsa holozernoho za dii mikrobnoho preparatu i rehuliatora rostu roslyn [The activity of antioxidant

enzymes in the plants of hulless oat under the use of a microbial preparation and plant growth regulator]. *Zbirnyk naukovykh prats Umanskooho NU [Collected Works of Uman National University]*. пуск 96. Ч. 1. С. 9–23. <https://doi.org/10.31395/2415-8240-2020-96-1-9-23> [in Ukrainian].

Karpenko, V. P., Prytuliak, R. M., Datsenko, A. A. & Ivasiuk Yu. I. (2016). Fiziolooho-biokhimichni mekhanizmy intehrovanoi dii herbitsydiv i rehulatoriv rostu roslyn [Physiological and biochemical integrated action mechanisms of herbicide and plant growth regulator]. *Visnyk Umanskooho natsionalnoho universytetu sadivnytstva [Bulletin of Uman National University of Horticulture]*, 1, 72–75 [in Ukrainian].

Prysedskyi, Yu. H. (2022). Velykyi praktykum z fizioloohii ta biokhimii roslyn (biokhimichni metody doslidzhen) [Large practical course on plant physiology and biochemistry (biochemical research methods)]. Vinnytsia: «TVORY», 418 c [in Ukrainian].

Rossykhina-Halycha, H. S., Bilchuk, V. S., Lehostaieva, T. V. & Shmahailo Yu. O. (2013). Doslidzhennia stanu prooksydantno-antyoksydantnoi systemy kukurudzy za dii herbitsyidnoho zabrudnennia [Antioxidant system of maize under herbicide pollution influence]. *Visnyk Lvivskoho universytetu [Visnyk of Lviv University]*, 61, 201–207 [in Ukrainian].

Alharby, H. F. Alzahrani, Y. M. & Rady, M. M. (2020). Seeds pretreatment with zeatins or maize grain-derived organic biostimulant improved hormonal contents, polyamine gene expression, and salinity and drought tolerance of wheat. *International Journal of Agriculture and Biology*, 24, 714–724. <https://doi.org/10.17957/IJAB/15.1491> [in English].

Bhupenchandra, I., Chongtham, S. K., Devi E. L., Choudhary A. K., Salam, M.D., Sahoo M.R. & Khaba, C. I. (2022). Role of biostimulants in mitigating the effects of climate change on crop performance. *Frontiers in plant science*, 13, 967665. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.967665> [in English].

Di Sario, L., Boeri, P., Matus, J. T. & Pizzio G. A. (2025). Plant biostimulants to enhance abiotic stress resilience in crops. *International Journal of Molecular Sciences (IJMS)*, 26(3), 1129. <https://doi.org/10.3390/ijms26031129> [in English].

Han, L., Li, Y., Li, Z. M. B., Liang, Y., Gao, P. & Zhao, X. (2025). Alleviation of saline-alkaline stress in alfalfa by a consortium of plant-growth-promoting rhizobacteria. *Plants*, 14(17), 2744. <https://doi.org/10.3390/plants14172744> [in English].

Hasanuzzaman, M., Borhannuddin Bhuyan, M. H. M., Zulfiqar, F., Raza, A., Mohsin, S. M., Al Mahmud J., Fujita M. & Fotopoulos V. (2020). Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: revisiting the crucial role of a universal defense regulator. *Antioxidants*, 9(8), 681. <https://doi.org/10.3390/antiox9080681> [in English].

Li, J., Qin, Z., Wang, L. & Xin, M. (2025). Advances in the metabolism and phytoremediation of pesticides in horticultural plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 302, 118634. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118634> [in English].

Karpenko, V., Pavlyshyn, S., Prytuliak, R. & Naherniuk, D. (2019). *Agronomy Research*, 17(1), 144–154. <https://doi.org/10.15159/AR.19.014> [in English].

Khan, M., Bhargava, P. & Goel R. (2019). Quorum sensing molecules of rhizobacteria: a trigger for developing systemic resistance in plants. *PGPR: Genetic Adaptation and Recent Advances*, 117–138. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6536-2_7 [in English].

Mahmudul, H., Muhammad, S. A.-H., Adam, M. R. & Hafizuddin, H. (2021). Bioherbicides: an eco-friendly tool for sustainable weed management. *Plants*, 10(6), 1212. <https://doi.org/10.3390/plants10061212> [in English].

Ortega, R., Miralles, I., Domene, M. A., Meca, D. & del Moral, F. (2024). Ecological practices increase soil fertility and microbial diversity under intensive farming. *Science of the total environment*, 954, 176777. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176777> [in English].

Ozhuner, E. (2025). Plant growth-promoting rhizobacteria enhance essential oil production and antioxidant activity of *Mentha piperita* under water deficit stress. *Agricultural Water Management*, 321, 109936. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109936> [in English].

Rouphael, Y. & Colla, G. (2020). Biostimulants in agriculture. *Frontiers in plant science*, 11, 40. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00040> [in English].

Vassileva, M., Flor-Peregrin, E., Malusá, E. & Vassilev, N. (2020). Towards better understanding of the interactions and efficient application of plant beneficial prebiotics, probiotics, postbiotics and synbiotics. *Frontiers in plant science*, 11, 01068. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01068> [in English].

Дата першого надходження статті до видання: 06.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 09.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)