

СИНЕРГІЯ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ І БІОПРЕПАРАТІВ У ФОРМУВАННІ ВРОЖАЙНОСТІ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР

М. С. ПОНОМАРЬОВА, кандидат економічних наук
Т. А. РОМАНОВА, кандидат сільськогосподарських наук
Державний біотехнологічний університет

У статті досліджено синергетичний ефект комбінованого застосування мінеральних добрив та біологічних препаратів як інструменту підвищення врожайності сільськогосподарських культур за умов сталого землеробства. Аналіз механізмів взаємодії охоплює біологічну фіксацію азоту, мобілізацію фосфатів мікроорганізмами та вплив мікробних інокулянтів на фізико-хімічні властивості ґрунту. За даними метааналізу, поєднання біодобрив і мінерального живлення забезпечує приріст врожайності на 67–82 % для бобових культур і дозволяє скоротити норми синтетичних добрив на 20–50 % без зниження продуктивності. Встановлено, що найвищий агрономічний і економічний ефект досягається при застосуванні біопрепаратів із подвійними властивостями – азотфіксуючими та фосфатрозчинюючими – у поєднанні з інструментами точного землеробства. Отримані результати підтверджують доцільність інтеграції біологічних і мінеральних компонентів системи живлення рослин як основи кліматично адаптованого та економічно стійкого сільськогосподарського виробництва.

Ключові слова: синергія добрив, біологічні препарати, мінеральне живлення, врожайність, азотфіксуючі бактерії, мікроорганізми що розчиняють фосфати, стале землеробство, точне землеробство.

Постановка проблеми. Забезпечення продовольчої безпеки в умовах зростання глобального попиту на продукти харчування вимагає принципового підвищення ефективності систем живлення рослин — одного з ключових чинників формування врожайності сільськогосподарських культур. Традиційне мінеральне удобрення залишається домінуючою практикою, проте його надмірне застосування призводить до деградації ґрунтів, забруднення водних ресурсів і прогресуючого зниження мікробного різноманіття агроєкосистем. Водночас використання виключно біологічних препаратів не завжди забезпечує достатній рівень врожайності, особливо на збіднених ґрунтах з дефіцитом основних макроелементів. Пошук збалансованих рішень, що поєднують переваги обох підходів, набуває дедалі більшої актуальності в контексті переходу до кліматично стійкого та економічно раціонального землеробства. Саме синергетичне поєднання мінеральних добрив і біологічних препаратів здатне усунути обмеження кожного із зазначених підходів, формуючи інтегровану систему управління живленням рослин нового покоління.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання ефективності комбінованого застосування мінеральних добрив і біологічних препаратів у системі живлення сільськогосподарських культур активно досліджуються вітчизняними науковцями. Л. Єремко та А. Кирлиця у польовому експерименті на кукурудзі довели, що поєднання біопрепарату з мінеральними добривами забезпечує суттєво вищу врожайність зерна порівняно з роздільним застосуванням кожного з компонентів, позитивно впливаючи на розвиток листової поверхні та інтенсивність фотосинтетичної діяльності рослин [1]. В Паламарчук та ін. встановили, що обробка насіння пшениці озимої біопрепаратами у поєднанні з мінеральним живленням підвищує не лише врожайність, але й якісні показники зерна – вміст білка та масу 1000 зерен, що підтверджує комплексний характер синергетичного ефекту [2].

К. Поліщук підтверджує, що передпосівна інокуляція насіння бактеріальними препаратами на фоні тривалого мінерального удобрення покращує поживний режим ґрунту та підвищує рентабельність виробництва [3]. В. Алмашова та С. Скок доводять перспективність біологічних препаратів і регуляторів росту як альтернативи екстенсивним системам землеробства, що зумовлюють деградацію агроєкосистем, акцентуючи увагу на екологічній безпечності та імуностимулюючій дії таких препаратів [4]. Група науковців під керівництвом Г. Чугрій показала, що ефективність мікробних препаратів суттєво залежить від фону живлення – мінерального чи органічного, що вказує на необхідність диференційованого підходу до формування систем удобрення [5].

Л. Єремко та В. Гангур встановили, що поєднане застосування мінеральних добрив, мікробіологічного препарату та мікродобрива для сої формує найвищу індивідуальну продуктивність рослин і забезпечує найбільший приріст урожайності зерна серед усіх досліджуваних варіантів [6]. Отже, результати вітчизняних досліджень переконливо підтверджують агрономічну ефективність синергетичного поєднання біологічних і мінеральних компонентів живлення, однак питання комплексної оцінки механізмів їхньої взаємодії в різних ґрунтово-кліматичних умовах та економічного обґрунтування інтегрованих систем удобрення залишаються недостатньо вивченими.

Методика досліджень. Дослідження базується на критичному огляді та метааналізі наукових публікацій, присвячених комбінованому застосуванню мінеральних добрив і біологічних препаратів у різних агрокліматичних умовах. Для оцінки синергетичного ефекту використано кількісне порівняння показників врожайності, ефективності засвоєння поживних речовин і економічної доцільності за контрольованими та інтегрованими схемами внесення добрив. Систематизацію даних здійснено методом структурно-логічного аналізу, що дозволило виявити закономірності реакції різних груп культур – зернових, бобових та овочевих – на синергетичні системи живлення. Для узагальнення результатів польових випробувань і лабораторних досліджень застосовано метод синтезу, який забезпечив можливість формулювання практичних рекомендацій щодо оптимальних норм і строків внесення препаратів. Економічна ефективність інтегрованих систем оцінювалась через показники витрат на гектар, приросту врожайності та окупності інвестицій у розрізі типів ґрунтів і виробничих умов.

Метою статті є дослідити агрономічну та економічну ефективність синергетичного поєднання мінеральних добрив і біологічних препаратів, визначити механізми їхньої взаємодії у системі живлення рослин та обґрунтувати практичні рекомендації щодо впровадження інтегрованих схем удобрення в умовах сталого сільськогосподарського виробництва.

Результати досліджень. Концепція синергії між мінеральними добривами та біологічними препаратами являє собою зміну парадигми в сучасному сільському господарстві, де комбіноване застосування неорганічних поживних речовин та живих мікробних систем створює покращені сільськогосподарські результати, що перевищують суму їхніх індивідуальних ефектів. Цей синергетичний підхід поєднує негайну доступність поживних речовин, що забезпечується мінеральними добривами, з поліпшенням здоров'я ґрунту та можливостями мобілізації поживних речовин біологічних препаратів, таких як мікробні інокулянти, біостимулятори та органічні добавки. Теоретична основа цієї концепції полягає у взаємодоповнюючих механізмах, за якими мінеральні добрива забезпечують швидке надходження поживних речовин, доступних для рослин, тоді як біологічні препарати покращують структуру ґрунту, підвищують мікробне різноманіття та оптимізують процеси кругообігу поживних речовин. Ця інтегрована стратегія усуває обмеження, пов'язані з використанням кожного з цих підходів окремо, створюючи більш стійку та ефективну сільськогосподарську систему, де біологічні процеси підвищують ефективність мінеральних добрив на 20–35 %, одночасно зменшуючи втрати поживних речовин через вимивання та випаровування.

Біологічні препарати суттєво сприяють поліпшенню здоров'я ґрунту та посиленню росту рослин завдяки мікробній активності, що виходить за межі простого забезпечення поживними речовинами. Мікробні інокулянти, що містять такі штами, як *Bacillus subtilis*, *Azotobacter chroococcum* та *Paenibacillus mucilaginosus*, збагачують фізико-хімічні властивості ґрунту, включаючи пористість, рН-баланс та загальний вміст поживних речовин, одночасно сприяючи розвитку різноманітних корисних мікробних спільнот, у яких переважають протеобактерії та базидіоміцети. Ці мікроорганізми покращують ріст коренів та здатність до засвоєння поживних речовин, створюючи симбіотичний цикл, в якому мінеральні добрива сприяють розмноженню мікроорганізмів, що, в свою чергу, підтримує довгострокову родючість ґрунту та здоров'я рослин. Біологічні препарати також надають додаткові переваги, включаючи пригнічення захворювань на 40–50 %, підвищену стійкість до екологічних стресів, таких як посуха та засоленість, а також поліпшення фізіологічних показників рослин, включаючи вміст хлорофілу та якість зерна [7]. Сукупність цих ефектів визначає не лише агрономічну, але й стратегічну цінність систем комбінованого живлення в контексті сталого розвитку сільськогосподарського виробництва.

Значення систем, що поєднують мінеральні добрива та біологічні препарати, для сучасного сталого сільського господарства є надзвичайно важливим у вирішенні актуальних сільськогосподарських проблем, зокрема деградації ґрунтів, забруднення навколишнього середовища та необхідності

підвищення врожайності для забезпечення продовольством зростаючого населення. Цей комплексний підхід дає змогу фермерам зменшити використання мінеральних добрив на 20–50 %, одночасно зберігаючи або збільшуючи врожайність на 10–40 % для різних видів культур, що сприяє як економічній стійкості, так і охороні навколишнього середовища. Система відповідає принципам циркулярного сільського господарства, використовуючи відходи та сприяючи відновленню ґрунту, водночас вирішуючи нагальну потребу у збереженні органічного вуглецю в ґрунті, запобіганні порушенням рівноваги рН та збереженні корисних мікробних спільнот, які часто виснажуються внаслідок інтенсивного використання хімічних добрив. У міру розвитку сільського господарства до 2026 року та в подальшому цей синергетичний підхід є життєздатним шляхом для досягнення оптимізації врожайності при збереженні довгострокового здоров'я ґрунту та зменшенні екологічного сліду сільськогосподарських практик [7]. Детальне розуміння біохімічних та агрономічних механізмів, через які досягається цей синергізм, є ключем до його ефективного практичного застосування. Серед задіяних механізмів ключову роль відіграють процеси біологічної фіксації азоту, що дозволяють суттєво знизити залежність від синтетичного азотного живлення.

Азотфіксуючі бактерії є наріжним каменем синергетичних систем удобрення, перетворюючи атмосферний азот у доступні для рослин форми за допомогою ферментів нітрогенази, одночасно зменшуючи залежність від синтетичних азотних добрив. Симбіотичні ризобії в бульбах коренів бобових, асоціативні види, такі як *Azospirillum* та *Bacillus* у травах, а також вільноживучі види, такі як *Clostridium* та *Azotobacter*, працюють в анаеробних умовах, поповнюючи запаси азоту в ґрунті завдяки постійному, локалізованому вивільненню, пов'язаному з потребами рослин. Ці бактерії можуть зменшити потребу в синтетичних азотних добривах на 20–33 % або до 150–300 фунтів на акр за оптимальних умов, мінімізуючи при цьому втрати поживних речовин через вимивання або стікання. Біологічний процес азотфіксації створює стале постачання поживних речовин, яке доповнює мінеральні добрива, забезпечуючи постійну доступність азоту протягом усього вегетаційного періоду, особливо в періоди, коли ефективність синтетичних добрив може знижуватися через екологічні фактори [8]. Паралельно з азотним циклом не менш важливим є управління фосфорним живленням, де роль біологічних компонентів виявляється не менш визначальною.

Мікроорганізми, що розчиняють фосфати, підвищують ефективність мінеральних добрив, перетворюючи нерозчинні фосфати ґрунту на легкодоступні форми шляхом виробництва органічних кислот, які хелатують зв'язані сполуки фосфору. Ці мікроорганізми покращують загальний кругообіг поживних речовин завдяки мінералізації органічної речовини та підвищеній катіонообмінній здатності, що сприяє не лише доступності фосфору, а й калію та інших необхідних поживних речовин. Синергетичний ефект виникає, коли азотфіксуючі бактерії стимулюють мікробну активність, що посилює розчинення фосфатів, тоді як покращена доступність фосфору підтримує процеси азотфіксації, створюючи позитивний зворотний зв'язок. Ця біологічна система

мобілізації фосфору працює у поєднанні з внесеними фосфатними добривами для максимізації ефективності поглинання фосфору, зменшення фіксації фосфору в ґрунтах та покращення здатності коренів до поглинання завдяки покращеній структурі ґрунту та зменшенню іммобілізації поживних речовин [9]. Кількісні результати цих взаємодій для різних груп сільськогосподарських культур систематизовано нижче (табл. 1).

Табл. 1. Синергетичний вплив біодобрив і мінерального живлення на врожайність сільськогосподарських культур

Тип культури	Обробка	Врожайність (кг/га)	Приріст врожайності (%)	Ключові синергетичні ефекти
Бобові (коров'ячий горох)	Мікориза + <i>Rhizobium</i> + NPK	4714	+82	Посилена фіксація азоту та розчинення фосфору
Бобові (коров'ячий горох)	Мікориза + <i>Rhizobium</i>	4321	+67	Біологічна мобілізація азоту та фосфору
Бобові (загалом)	Біодобриво + мінеральні добрива	2500–3200	+15–20	Найвища ефективність використання азоту
Зернові	Азотфіксуючі та фосфатрозчинюючі бактерії	2800–3400	+12–18	Покращений кругообіг поживних речовин
Овочеві	Комбінований підхід біодобрив	2600–3300	+12–18	Покращена взаємодія «корінь–поживні речовини»

Примітка. Ефективність використання азоту для бобових становить 8,3 кг приросту зерна на 1 кг внесеного азоту добривами [10]. Діапазони врожайності для узагальнених груп культур наведено за даними метааналізу [7–10].

Як свідчать дані, наведені у таблиці 1, кількісний аналіз синергетичних ефектів показує значне підвищення врожайності при поєднанні біологічних препаратів з мінеральними добривами порівняно з використанням кожного з цих підходів окремо. У бобових культурах, зокрема у коров'ячому горосі, поєднання мікоризних грибів та бактерій *Rhizobium* з NPK-добривами дозволило досягти врожайності 4 714 кг/га порівняно з 2 592 кг/га без внесення добрив, що становить 82 % зростання порівняно з контролем. Примітно, що лише біологічний препарат (мікориза плюс ризобій) забезпечив урожайність 4 321 кг/га з вищим співвідношенням вигоди до витрат (3,76) порівняно з хімічними комбінаціями, що демонструє, що біологічні препарати можуть досягати порівнянної ефективності за нижчих економічних витрат. Дані

метааналізу вказують, що біодобрива, які володіють як азотфіксуючими, так і фосфатрозчинючими властивостями, демонструють найвищий потенціал для підвищення врожайності, причому бобові культури демонструють найбільш виражену реакцію – 8,3 кг приросту врожаю на 1 кг азотного добрива, внесеного шляхом біодобривання [10]. За цими кількісними показниками стоять конкретні фізіологічні механізми, що визначають спроможність кореневої системи рослин засвоювати поживні елементи з більшою ефективністю.

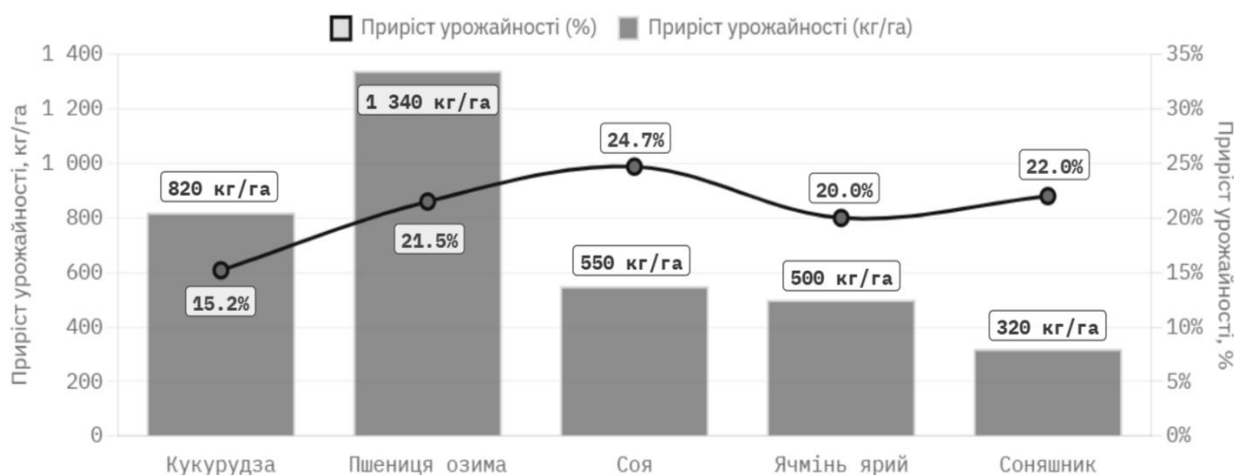


Рис. 1. Приріст врожайності сільськогосподарських культур від комбінованого застосування мінеральних добрив і біопрепаратів

Механізми, що лежать в основі покращеного поглинання поживних речовин, передбачають формування мутуалістичних відносин між біологічними препаратами та корінням рослин, що розширює здатність до засвоєння поживних речовин понад можливості застосування традиційних добрив. Мікоризні гриби та азотфіксуючі бактерії створюють розгалужені мережі гіф, що збільшують площу поверхні коренів та доступ до ґрунтових мінералів, одночасно розкладаючи органічну речовину для вивільнення додаткових поживних речовин, таких як азот та фосфати. Ці біологічні системи доповнюють шляхи масового потоку та дифузії мінеральних добрив, сприяючи механізмам активного транспорту та котранспорту, що оптимізують доставку поживних речовин до рослин. Синергетичний ефект виникає тому, що мікроорганізми можуть мобілізувати нерозчинні поживні речовини з мінералів ґрунту набагато ефективніше, ніж це можуть зробити лише розчинні добрива, створюючи комплексну систему доставки поживних речовин, яка зменшує залежність від добрив та водночас покращує загальну врожайність. Інтенсивність описаних реакцій при цьому суттєво варіює залежно від біологічних особливостей конкретних сільськогосподарських культур та їхніх природних мікробних асоціацій.

Реакції конкретних культур на синергетичні системи удобрення суттєво варіюються залежно від фізіології рослин, архітектури кореневої системи та їхніх природних мікробних асоціацій. Зернові культури отримують користь від асоціативних азотфіксуючих бактерій та мікроорганізмів, що розчиняють

фосфати, які посилюють цикл поживних речовин та покращують якість зерна, хоча реакції, як правило, є більш помірними, ніж у бобових культур, через менш спеціалізовані взаємовідносини між коренями та мікроорганізмами. Овочі демонструють покращену ефективність поглинання поживних речовин завдяки посиленим взаємодіям між коренями та поживними речовинами, створеним біологічними препаратами, що призводить до кращої життєздатності рослин та якості врожаю. Бобові культури демонструють найдраматичніші реакції завдяки своїй природній здатності до симбіотичного азотфіксації, причому подвійні стратегії інокуляції (мікориза плюс ризобій) виявляються особливо ефективними. Синергетичний ефект є найбільш вираженим, коли біологічні препарати з множинними властивостями (як здатність до фіксації азоту, так і розчинення фосфору) поєднуються з відповідним зменшенням внесення мінеральних добрив, створюючи оптимізовані системи управління поживними речовинами, адаптовані до конкретних потреб культур [10]. Розуміння цих закономірностей безпосередньо визначає вибір оптимальних протоколів практичного застосування синергетичних систем удобрення. У таблиці 2 наведено кількісні показники в уніфікованих одиницях виміру. За відсутності в опрацьованих джерелах достатніх даних для розрахунку показника в зазначених одиницях, відповідну позицію позначено «н/д» (немає даних). Базовим рівнем порівняння для відносних показників («% до інтегрованої системи» або «% відносно базового рівня») є інтегрована система удобрення.

Практичне впровадження систем синергетичного застосування мінеральних добрив та біологічних препаратів вимагає ретельної уваги до термінів внесення, оптимізації дозування та вибору методів для отримання максимальної користі. Хоча конкретні протоколи на 2026 рік ще розробляються, сучасні найкращі практики передбачають внесення біологічних препаратів під час підготовки ґрунту або під час посіву для створення мікробних популяцій до внесення мінеральних добрив. Рекомендації щодо дозування зазвичай передбачають зменшення внесення синтетичного азоту та фосфатів на 15–50 % у поєднанні з відповідними біодобривами, причому конкретні співвідношення залежать від стану ґрунту та потреб культур. Методи внесення повинні інтегрувати інструменти точного землеробства, такі як обладнання з GPS-навігацією, датчики ґрунту та програмне забезпечення для управління поживними речовинами, щоб оптимізувати розміщення та терміни, забезпечуючи захист біологічних препаратів від стресів навколишнього середовища, тоді як мінеральні добрива підтримують заселення та активність мікроорганізмів [11]. Дотримання цих протоколів забезпечує не лише агрономічну ефективність, але й відчутний економічний ефект для сільськогосподарських підприємств.

Економічні переваги інтегрованих систем внесення добрив демонструють суттєву економію витрат та підвищення прибутковості сільськогосподарських господарств. Фермери можуть досягти щорічної економії у розмірі 100–300+ доларів на гектар завдяки скороченню внесення синтетичних добрив на 15–50 %, одночасно зберігаючи або підвищуючи врожайність на 15–25 %, причому особливо висока економічна віддача спостерігається на піщаних ґрунтах з низькою родючістю, де біологічні препарати забезпечують більші відносні переваги.

Табл. 2. Порівняльна ефективність різних систем удобрення за агрономічними, економічними та екологічними показниками

Показник (одиниця виміру)	Тільки мінеральні добрива	Тільки біологічні препарати	Інтегрована система
Агрономічні показники			
Приріст врожайності (% до контролю без добрив)	10–18	8–15	18–25
Засвоєння азоту рослинами (% до інтегрованої системи)	-15...-20	-10...-15	0 (базовий рівень)
Засвоєння фосфору рослинами (% до інтегрованої системи)	-20...-25	-5...-10	0 (базовий рівень)
Вміст білка в зерні (% відносно базового рівня)	-0,3...-0,5	-0,3...-0,5	+0,5...+0,8
Пригнічення збудників хвороб (%)	н/д*	40–50	40–50
Показники родючості ґрунту			
Вміст органічної речовини (% зміни відносно початкового)	-5...-10 (при інтенсивному внесенні)	0 (стабілізація)	+39
Мікробне різноманіття ґрунту (% зміни)	-5...-15	+5...+10	+15...+25
Активність ферменту фосфатаза (% зміни)	-5...-15	0 (стабільна)	+25...+67
Вуглець мікробної біомаси (% зміни)	-10...0	+12...+18	+27
Економічні показники			
Витрати на добрива (\$/га/рік, відносно інтегрованої системи)**	+100...+150	-10...-30	0 (базовий рівень)
Економія витрат (\$/га/рік)	н/д	50–80	100–300
Окупність інвестицій (BCR, коефіцієнт)	1,2–1,8	2,5–3,8 (макс. 3,76)	2,8–4,2
Самодостатність системи (термін досягнення, років)	не досягається	4–5 років	3–4 роки
Екологічні показники			
Вуглецевий слід виробництва (% відносно мінеральної системи)	0 (базовий рівень)	-25...-30	-15...-20
Вимивання нітратів (кг N/га/рік)	40–60	10–20	5–15
Вимивання фосфору (кг P ₂ O ₅ /га/рік)	5–10	1–3	1–2

Примітка. BCR (benefit–cost ratio) — співвідношення вигод до витрат. Дані систематизовано на основі джерел [1–6] з узагальненням за метааналізом [7–13].

Економічні переваги стають більш вираженими з часом, оскільки інтегровані системи забезпечують самодостатню доступність поживних речовин

через 3–4 роки без необхідності додаткового внесення інокулянтів. Нещодавні польові випробування, такі як вирощування пшениці на посушливих суходольних землях із використанням інтегрованого компосту, оксиду цинку та бактерій, що розчиняють цинк, продемонстрували вищі врожаї зерна та покращення поглинання поживних речовин, включаючи збільшення поглинання азоту на 15,9 %, фосфору на 15 % та цинку на 39,4 % порівняно з традиційними підходами [12].

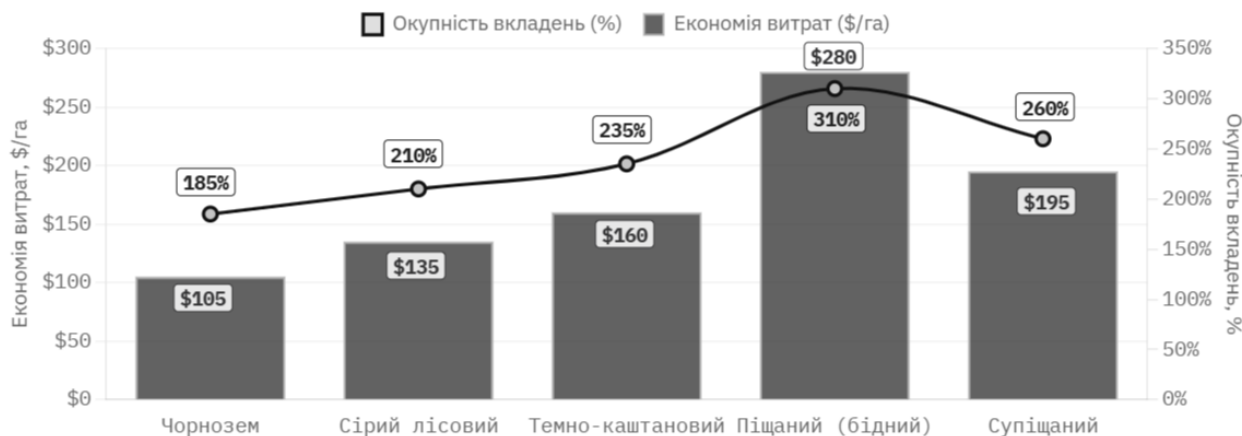


Рис. 2. Економічна ефективність інтегрованих систем удобрення: економія витрат (\$/га) та окупність вкладень (%) за типом ґрунту

Екологічні переваги систем синергетичного внесення добрив виходять за межі простого скорочення обсягів внесення і охоплюють комплексне поліпшення стану ґрунту та зменшення забруднення. Ці системи підвищують вміст органічної речовини в ґрунті на 39 %, збільшують вміст вуглецю в мікробній біомасі на 27 % та покращують активність ферментів, таких як фосфатаза, на 25–67 %, створюючи більш стійкі та продуктивні ґрунтові екосистеми. Інтегрований підхід зменшує забруднення навколишнього середовища завдяки зниженню попиту на виробництво хімічних добрив, зменшенню вуглецевого сліду на 15–20 % та мінімізації стоку та вимивання поживних речовин, що сприяють погіршенню якості води. Додаткові екологічні переваги включають покращення водоутримуючої здатності, підвищену толерантність до солі та посухи, біоремедіацію забруднення важкими металами та сприяння розвитку корисних ґрунтових організмів, зокрема дощових черв'яків та мікоризних грибів, які підтримують довгострокове здоров'я екосистеми [13]. Документований спектр екологічних переваг формує міцне підґрунтя для прогнозування напрямів подальшого вдосконалення синергетичних систем удобрення.

Перспективи на майбутнє щодо синергетичних систем удобрення вказують на все більш досконалі інтегровані підходи до управління поживними речовинами, що використовують передові біотехнології та можливості точного землеробства. Тенденції досліджень підкреслюють розвиток систем циркуляції поживних речовин за участю мікроорганізмів, які можуть адаптуватися до складних умов, таких як посушливі землі та гіпсові ґрунти, з потенційним розширенням на різноманітні культури, включаючи фрукти та овочі. Нові технології

зосереджуються на стабілізації вуглецю в умовах кліматичних змін, стратегіях біофортифікації для підвищення поживної цінності та кліматично стійких системах виробництва сільськогосподарських культур, що підтримують продуктивність в умовах екологічного стресу. Інтеграція біологічних агентів із добривами з контрольованим вивільненням та інтелектуальними системами доставки є перспективним напрямком для створення саморегулюючих систем управління поживними речовинами, що оптимізують як економічну віддачу, так і екологічну стійкість для наступного покоління сільськогосподарського виробництва.

Висновки. Проведений аналіз засвідчує, що синергетичне поєднання мінеральних добрив і біологічних препаратів забезпечує якісно вищий агрономічний результат порівняно з роздільним застосуванням кожного з підходів, що підтверджується як даними польових експериментів, так і результатами метааналізу наукових джерел. Ключовим механізмом цього ефекту є взаємне підсилення: мінеральні добрива стимулюють розмноження мікроорганізмів, які, своєю чергою, підвищують доступність поживних елементів і формують стійке ґрунтове середовище, здатне підтримувати продуктивність культур протягом тривалого часу. Встановлено, що найвищу ефективність демонструють біопрепарати з подвійними функціями – азотфіксуючими та фосфатрозчинюючими властивостями, особливо на збіднених ґрунтах, де їхній внесок у загальний приріст врожайності є найбільш відчутним. Окрім агрономічної складової, інтегровані системи удобрення мають суттєві економічні та екологічні переваги: вони дозволяють скоротити норми синтетичних добрив без втрати продуктивності, знижують ризики вимивання нітратів і фосфатів, відновлюють мікробне різноманіття ґрунту та зменшують вуглецевий слід виробництва. Перспективним напрямом подальших досліджень є розроблення диференційованих протоколів застосування інтегрованих систем живлення з урахуванням типу ґрунту, агрокліматичної зони та біологічних особливостей конкретних культур, що дозволить повною мірою реалізувати потенціал синергетичного підходу в умовах українського землеробства.

Література:

1. Єремко Л. С., Кирлиця А. О. Вплив біо- та мінеральних добрив на урожайність зерна кукурудзи. *Scientific Progress & Innovations*. 2025. Т. 28, № 3. С. 19–24. DOI: <https://doi.org/10.31210/spi2025.28.03>
2. Паламарчук В. Д., Азуркін В. О., Кричковський В. Ю. Формування елементів структури врожаю пшениці озимої залежно від варіантів удобрення. *Podolian Bulletin Agriculture Engineering Economics*. 2025. № 49. С. 132–141. DOI: <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2025-4.20>
3. Polischuk K. Ефективність біопрепаратів у системі біологічного землеробства на меліорованих землях Волинського Полісся. *Agricultural and Resource Economics: International Scientific E-Journal*. 2015. Т. 1, № 1. С. 38–47. DOI: <https://doi.org/10.51599/are.2015.01.01.04>
4. Алмашова В. С., Скок С. В. Ефективність використання біологічних та регуляторів росту для вирощування сільськогосподарських культур у зоні Південного степу України. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The series: Agronomy and Biology*. 2022. Т. 47, № 1. С. 11–17. <https://doi.org/10.32845/agrobio.2022.1.2>

5. Чугрій Г. Вплив мінерального та органічного живлення на біометричні показники та врожайність ячменю ярого при використанні мікробних препаратів та регуляторів росту. *Education and Science of Today: Intersectoral Issues and Development of Sciences* : матеріали міжнар. наук.-практ. конф. / голова орг. ком. О. Вінюков, О. Бондарева, Н. Скнипа. 2023. DOI: <https://doi.org/10.36074/logos-18.08.2023.32>

6. Єремко Л. С., Гангур В. В. Особливості формування індивідуальної продуктивності рослин сої (*Glycine hispida* Moench.) за різної забезпеченості елементами мінерального живлення. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2022. № 3. С. 40–46. <https://doi.org/10.31210/visnyk2022.03.05>

7. Synergistic effects of beneficial microbial inoculants and SMS amendments on soil properties and plant growth. *Frontiers in Microbiology*. 2025. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12434066/> (дата звернення: 17.03.2026).

8. Exploiting Biological Nitrogen Fixation: A Route Towards a Sustainable Agriculture. *Frontiers in Microbiology*. 2020. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7464700/> (дата звернення: 17.03.2026).

9. Phosphate-Solubilizing Bacteria: Advances in Their Mechanism and Application in Sustainable Agriculture. *Microorganisms*. 2023. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10745930/> (дата звернення: 17.03.2026).

10. Improving Crop Yield and Nutrient Use Efficiency via Biofertilization – A Global Meta-Analysis. *Frontiers in Plant Science*. 2018. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5770357/> (дата звернення: 17.03.2026).

11. Soil Microbial Resources for Improving Fertilizers Efficiency in an Integrated Plant Nutrient Management System. *Frontiers in Microbiology*. 2018. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6079243/> (дата звернення: 17.03.2026).

12. Розвиток інтенсивних систем землеробства на зрошуваних землях Півдня України : методичні рекомендації. Херсон : ІЗЗ НААН, 2020. URL: https://ovoch.com/assets/files/library/methodical/2020/2-mr-rozvitok-intensivnih-sistem_r-2020.pdf (дата звернення: 17.03.2026).

13. Hussain A. et al. Comparative impact of bio-organic and inorganic fertilizer application on soil health, grain quality and yield stability in nutrient deficient regions. *SOIL*. 2026. Vol. 12, no. 1. P. 133–149. DOI: <https://doi.org/10.5194/soil-12-133-2026>

References:

1. Yerenko, L. S., & Kyrylytsia, A. O. (2025). Influence of bio- and mineral fertilizers on maize grain yield. *Scientific Progress & Innovations*, 28(3), 19–24. <https://doi.org/10.31210/spi2025.28.03.03>. [in Ukrainian]

2. Palamarchuk, V. D., Azurkin, V. O., & Krychkovskiy, V. Yu. (2025). Formation of yield structure elements of winter wheat depending on fertilization options. *Podilian Bulletin: Agriculture Engineering Economics*, (49), 132–141. <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2025-4.20>. [in Ukrainian]

3. Polischuk, K. (2015). Effectiveness of biological preparations in the system of organic farming on reclaimed lands of Volyn Polissia. *Agricultural and Resource Economics: International Scientific E-Journal*, 1(1), 38–47. <https://doi.org/10.51599/are.2015.01.01.04>. [in Ukrainian]

4. Almashova, V. S., & Skok, S. V. (2022). Efficiency of biological products and growth regulators in crop production in the Southern Steppe zone of Ukraine.

Bulletin of Sumy National Agrarian University. Series: Agronomy and Biology, 47(1), 11–17. <https://doi.org/10.32845/agrobio.2022.1.2>. [in Ukrainian]

5. Chuhrii, H. (2023). Influence of mineral and organic nutrition on biometric indicators and yield of spring barley using microbial preparations and growth regulators. In O. Viniukov, O. Bondareva, & N. Sknypa (Eds.), *Education and Science of Today: Intersectoral Issues and Development of Sciences: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. <https://doi.org/10.36074/logos-18.08.2023.32>. [in Ukrainian]

6. Yerenko, L. S., & Hanhur, V. V. (2022). Features of individual productivity formation in soybean plants (*Glycine hispida* Moench.) under different mineral nutrition supply. *Bulletin of Poltava State Agrarian Academy*, (3), 40–46. <https://doi.org/10.31210/visnyk2022.03.05>. [in Ukrainian]

7. Synergistic effects of beneficial microbial inoculants and SMS amendments on soil properties and plant growth (2025) [Electronic resource]. *Frontiers in Microbiology*. Available at: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12434066/> (accessed: 17.03.2026).

8. Exploiting biological nitrogen fixation: A route towards sustainable agriculture (2020) [Electronic resource]. *Frontiers in Microbiology*. Available at: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7464700/> (accessed: 17.03.2026).

9. Phosphate-solubilizing bacteria: Advances in their mechanism and application in sustainable agriculture (2023) [Electronic resource]. *Microorganisms*. Available at: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10745930/> (accessed: 17.03.2026).

10. Improving crop yield and nutrient use efficiency via biofertilization — A global meta-analysis (2018) [Electronic resource]. *Frontiers in Plant Science*. Available at: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5770357/> (accessed: 17.03.2026).

11. Soil microbial resources for improving fertilizer efficiency in an integrated plant nutrient management system (2018) [Electronic resource]. *Frontiers in Microbiology*. Available at: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6079243/> (accessed: 17.03.2026).

12. Development of intensive farming systems on irrigated lands of Southern Ukraine: Methodological recommendations (2020) [Electronic resource]. Kherson: Institute of Irrigated Agriculture NAAS. Available at: https://ovoch.com/assets/files/library/methodical/2020/2-mr-rozvitok-intensivnih-sistem_r-2020.pdf (accessed: 17.03.2026). [in Ukrainian]

13. Hussain, A., et al. (2026). Comparative impact of bio-organic and inorganic fertilizer application on soil health, grain quality and yield stability in nutrient deficient regions. *SOIL*, 12(1), 133–149. <https://doi.org/10.5194/soil-12-133-2026>.

Annotation

Ponomariova M. S., Romanova T. A.

Synergy of mineral fertilizers and biopreparations in the formation of crop yield of agricultural crops

The article investigates the synergistic effect of the combined application of mineral fertilizers and biological preparations as a tool for increasing the yield of agricultural crops under sustainable farming conditions. The study examines the

theoretical foundations and practical mechanisms of the interaction between inorganic nutrients and living microbial systems, including biological nitrogen fixation by symbiotic rhizobia, associative Azospirillum and free-living Azotobacter species, phosphate solubilization by acid-producing bacteria, and the contribution of microbial inoculants containing Bacillus subtilis, Azotobacter chroococcum and Paenibacillus mucilaginosus to the physicochemical improvement of soil properties.

The methodological basis combines critical review and meta-analysis of scientific publications, quantitative comparison of yield indicators and nutrient use efficiency across controlled and integrated fertilization schemes, structural-logical analysis, and economic assessment through cost-per-hectare and return-on-investment metrics across soil types.

It is established that the combined application of biofertilizers and mineral nutrition increases crop yields by 67–82% for legumes and allows synthetic fertilizer rates to be reduced by 20–50% without productivity losses. The highest agronomic and economic effect is achieved through the application of dual-function bioproducts – those possessing both nitrogen-fixing and phosphate-solubilizing properties – in conjunction with precision agriculture tools such as GPS-guided equipment and soil sensor systems. The comparative analysis of three fertilization systems demonstrates that integrated management outperforms mineral-only and biological-only approaches across all evaluated dimensions: agronomic performance, soil health indicators, economic efficiency and environmental impact. Annual cost savings reach USD 100–300+ per hectare, soil organic matter increases by up to 39%, and the carbon footprint of production is reduced by 15–20%. It is concluded that integrated plant nutrition systems should be treated as a comprehensive agro-economic mechanism capable of delivering food security of a new type – effective, ecologically balanced and oriented towards long-term sustainability of Ukrainian agriculture.

Key words: *fertilizer synergy, biological preparations, mineral nutrition, crop yield, nitrogen-fixing bacteria, phosphate-solubilizing microorganisms, sustainable agriculture, precision farming, integrated nutrient management, soil health.*