

ПРОДУКТИВНІСТЬ АГРОЦЕНОЗІВ ПРИ ВИРОЩУВАННІ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР ЗА РІЗНИХ СИСТЕМ УДОБРЕННЯ ТА ІНОКУЛЯЦІЇ

М. М. Пархоменко, <https://orcid.org/0000-0001-8804-0813>

Інститут сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН
вул. Шевченка, 97; м. Чернігів, 14030, Україна; e-mail: miroslav.parkhomenko@gmail.com

Мета. Дослідити ефективність різних систем удобрення та передпосівної інокуляції насіння мікробними препаратами за вирощування сільськогосподарських культур у двох типах сівозмін на дерново-підзолистому ґрунті. **Методи.** Польового дослід (тривалий стаціонарний польовий дослід Інституту сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН), вагові (для обліку врожайності), статистичні. Технології вирощування культур — типові для регіону. Для інокуляції посівного / посадкового матеріалу використовували такі біопрепарати: для пшениці озимої, пшениці ярої та кукурудзи — Поліміксобактерин (на основі *Paenibacillus polytuxa*); для конюшини — Ризобофіт (на основі *Rhizobium leguminosarum* sv. *trifolii*); для жита озимого — Діазобактерин (на основі *Azospirillum brasilense*); для картоплі — Біогран (на основі *Azospirillum brasilense* та фізіологічно активних речовин біологічного походження), для вівса — Мікрогумін (на основі *Azospirillum brasilense*); для люпину вузьколистого — Ризогумін (на основі *Bradyrhizobium lupini*). **Результати.** У середньому за 2016–2020 рр. високі показники продуктивності в досліджуваних сівозмінах — зерновій (кукурудза на зерно → пшениця яра → конюшина → пшениця озима) і картопляно-зерновій (картопля → овес → люпин вузьколистий на зерно → жито озиме) отримано за використання середньосівозмінної норми мінеральних добрив $N_{60}P_{50}K_{60}$ по фоні прямої дії та післядії проміжних сидератів (люпин вузьколистий і жито озиме), а також за внесення мінеральних добрив по фоні дії і післядії 10 т/га підстилкового гною великої рогатої худоби. Ефективність поєднання туків із сидератами наближалася до такої за використання гною в поєднанні з мінеральними добривами. Найвищу продуктивність обох досліджуваних сівозмін отримано у варіантах, де поєднували мінеральні добрива із сумарною дією й післядією люпинового сидерату і гною. Післядія проміжних сидератів прослідковувалася протягом трьох років. Застосування мікробних препаратів забезпечувало суттєві прирости продуктивності сівозмін. Найкращим для прояву ефективності біопрепаратів було застосування мінеральних добрив по фоні дії та післядії проміжних сидератів, а також за поєднання 10 т/га гною, люпинового сидерату й мінеральних добрив у нормі $N_{60}P_{50}K_{60}$. **Висновки.** Застосування мінеральних добрив при вирощуванні сільськогосподарських культур на дерново-підзолистому ґрунті бажано поєднувати з органічними. Проміжні сидерати є потужним удобрювальним чинником, який може бути суттєвим доповненням і навіть альтернативою 10 т/га гною. Використання мікробних препаратів сприяє суттєвому зростанню продуктивності сівозмін.

Ключові слова: органічні та мінеральні добрива, мікробні препарати, дерново-підзолистий ґрунт, кормові одиниці.

Вступ. Перспективи використання мікробних препаратів у технологіях вирощування сільськогосподарських культур стають цілком зрозумілими в останні роки, що по-

яснюється як деградаційним станом ґрунтів, втратою біорізноманіття та забрудненням довкілля залишками агрохімікатів [1–3], так і задекларованими в численних публікаціях

ефектами щодо зростання продуктивності агроценозів [4–7]. Проте цей агрозахід ще не набув системності через низку організаційних причин, а також унаслідок обмежених результатів досліджень впливу рістстимуляторних мікроорганізмів (PGPM) на формування урожайності сільськогосподарських культур за різних систем удобрення та їх вирощування в сівозміні, коли теоретично може просліджуватися не лише дія, а й різноспрямована післядія біопрепаратів. Це визначає актуальність проведення досліджень у такому напрямі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сьогодні в багатьох наукових центрах України та інших країн створено низку мікробних препаратів на основі PGPM, які все частіше розглядаються як екологічно обгрунтоване доповнення (а інколи й альтернатива) агрохімікатам із потенціалом розв'язання двох глобальних проблем — забезпечення продовольчої безпеки й екологічної стійкості [8–13]. PGPM здатні збільшити доступність для рослин основних поживних речовин, насамперед азоту й фосфору, через активізацію біологічної азотфіксації і солюбілізацію фосфатів у кореневій зоні рослин, а також можуть безпосередньо сприяти росту рослин, забезпечуючи або змінюючи метаболізм фітогормонів, таких як ауксини, цитокініни, абсцизова кислота, гібереліни й етилен [14–16]. Крім покращення засвоєння інокульованими рослинами азоту й фосфору, PGPM сприяють підсиленню надходження й інших елементів, необхідних для нормального метаболізму в рослинному організмі — калію, сірки, заліза та ін. [17; 18].

Важливим чинником позитивного впливу PGPM на ріст і розвиток рослин також може бути продукування ними гідролітичних ферментів за розвитку в ризосферному ґрунті, що зі свого боку сприяє покращенню мінерального живлення, активізує фотосинтетичний процес і додаткове надходження в кореневі сфери легкодоступного вуглецю, який забезпечує інтенсивний розвиток й активність гетеротрофних мікроорганізмів у цій ніші [19; 20]. Усі вищезазначені складові механізми взаємодії «мікроорганізм — рослина» можуть проявлятися різною мірою залежно від ґрунтово-кліматичних умов та етапів органогенезу [21].

Як свідчать літературні дані, ефективність передпосівної інокуляції може бути високою при вирощуванні сільськогосподарських культур по невисоких мінеральних агрофонах [22–24]. Водночас ефективність інтродукції PGPM в агроценози за вирощування культур по органічних агрофонах відрізняється залежно від виду добрива — за використання сидератів вона підсилюється й водночас може нівелюватися при застосуванні для удобрення підстилкового гною великої рогатої худоби [25; 26]. Останнє пояснюється створенням інтенсивного конкурентного середовища в ґрунті внаслідок надходження з гноєм величезної кількості мікроорганізмів, що перешкоджає встановленню тісної взаємодії інтродукованих в агроценоз бактерій із рослинами. Утім, негативний вплив гною на ефективність мікробних препаратів, зазвичай затухає протягом 2–3 років [27].

Варто зазначити, що більшість досліджень ефективності біопрепаратів проведено в умовах разових польових дослідів. Повідомлення, що стосуються результатів застосування інокуляції при вирощуванні сільськогосподарських культур у сівозміні, поодинокі й переважно стосуються класичних інокулянтів — препаратів на основі бульбочкових бактерій або арбускулярної мікоризи [28–30].

Вищенаведена інформація свідчить про важливість проведення досліджень ефективності мікробних препаратів, у т. ч. і для небобових культур, з урахуванням умов сівозмінного чинника та систем удобрення сільськогосподарських культур.

Мета досліджень. З'ясувати ефективність передпосівної інокуляції насіння сільськогосподарських культур за їх вирощування у двох типах сівозмін залежно від умов забезпечення поживними речовинами.

Матеріали та методи досліджень. Дослідження проводили протягом 2016–2020 рр. у тривалому польовому стаціонарному досліді Інституту сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва (ІСМАВ) НААН на дерново-підзолистому ґрунті (ґрунт дослідних ділянок має рН_{KCl} орного шару 4,9, підорного — 4,6; вміст гумусу (за Тюриним) — 1,1%; P₂O₅ (за Кірсановим) — 16 мг на 100 г ґрунту; K₂O (за Масловою) — 6 мг на 100 г ґрунту) при

виросуванні сільськогосподарських культур у двох типах сівозмін і різних системах удобрення. Загальна площа кожної ділянки — 102 м², (довжина — 17 м, ширина — 6 м), облікової — 60 м² (довжина — 15 м, ширина — 4 м), повторність — чотириразова. Розміщення ділянок у досліді рендомізоване.

Зернова сівозмінна: кукурудза на зерно → пшениця яра → конюшина → пшениця озима.

Системи удобрення сільськогосподарських культур у сівозміні наведено в табл. 1.

Зерно-картопляна сівозмінна: картопля → овес → люпин вузьколистий → жито озиме на зерно. Системи удобрення культур наведено в табл. 2.

Хоча системи удобрення для обох сівозмін дещо відрізнялися залежно від культур, середньосівозмінні норми добрив були

Таблиця 1. Варіанти удобрення сільськогосподарських культур у зерновій сівозміні

| Кукурудза | Пшениця яра | Конюшина | Пшениця озима |
|--|---|---|---|
| Блок 1 — без інокуляції | | | |
| Без добрив | Без добрив | Без добрив | Без добрив |
| N ₁₀₀ P ₉₀ K ₁₀₀ | N ₅₀ P ₅₀ K ₆₀ | P ₂₀ K ₂₀ | N ₅₀ P ₅₀ K ₆₀ |
| Сидерат 1 (люпин вузьколистий) + N ₁₀₀ P ₉₀ K ₁₀₀ | Сидерат 1* + N ₅₀ P ₅₀ K ₆₀ | Сидерат 1** + P ₂₀ K ₂₀ | Сидерат 1*** + N ₅₀ P ₅₀ K ₆₀ |
| Сидерат 2 (жито озиме) + N ₁₀₀ P ₉₀ K ₁₀₀ | Сидерат 2* + N ₅₀ P ₅₀ K ₆₀ | Сидерат 2** + P ₂₀ K ₂₀ | Сидерат 2*** + N ₅₀ P ₅₀ K ₆₀ |
| Гній, 10 т/га + N ₁₀₀ P ₉₀ K ₁₀₀ | Гній* + N ₅₀ P ₅₀ K ₆₀ | Гній, 10 т/га** + P ₂₀ K ₂₀ | Гній*** + N ₅₀ P ₅₀ K ₆₀ |
| Сидерат 1 + гній, 10 т/га + N ₁₀₀ P ₉₀ K ₁₀₀ | Сидерат 1* + гній*, 10 т/га + N ₅₀ P ₅₀ K ₆₀ | Сидерат 1** + гній**, 10 т/га + P ₂₀ K ₂₀ | Сидерат 1*** + гній***, 10 т/га + N ₅₀ P ₅₀ K ₆₀ |
| Гній, 20 т/га | Гній, 20 т/га* | Гній, 20 т/га** | Гній, 20 т/га*** |
| Блок 2 — за використання мікробних препаратів | | | |
| Аналогічні варіанти удобрення | | | |

Примітка: тут і в табл. 2: *) — першого року післядія; **) — другого року післядія; ***) — третього року післядія.

Таблиця 2. Варіанти удобрення сільськогосподарських культур у картопляно-зерновій сівозміні

| Картопля | Овес | Люпин вузьколистий | Жито озиме |
|--|---|---|---|
| Блок 1 — без інокуляції | | | |
| Без добрив | Без добрив | Без добрив | Без добрив |
| N ₁₀₀ P ₉₀ K ₁₂₀ | N ₆₀ P ₅₀ K ₆₀ | P ₂₀ K ₂₀ | N ₆₀ P ₅₀ K ₆₀ |
| Сидерат 1 (люпин вузьколистий) + N ₁₀₀ P ₉₀ K ₁₂₀ | Сидерат 1* + N ₆₀ P ₅₀ K ₆₀ | Сидерат 1** + P ₂₀ K ₂₀ | Сидерат 1*** + N ₆₀ P ₅₀ K ₆₀ |
| Сидерат 2 (жито озиме) + N ₁₀₀ P ₉₀ K ₁₂₀ | Сидерат 2* + N ₆₀ P ₅₀ K ₆₀ | Сидерат 2** + P ₂₀ K ₂₀ | Сидерат 2*** + N ₆₀ P ₅₀ K ₆₀ |
| Гній, 10 т/га + N ₁₀₀ P ₉₀ K ₁₂₀ | Гній* + N ₆₀ P ₅₀ K ₆₀ | Гній, 10 т/га** + P ₂₀ K ₂₀ | Гній*** + N ₆₀ P ₅₀ K ₆₀ |
| Сидерат 1 + гній, 10 т/га + N ₁₀₀ P ₉₀ K ₁₂₀ | Сидерат 1* + гній*, 10 т/га + N ₆₀ P ₅₀ K ₆₀ | Сидерат 1** + гній**, 10 т/га + P ₂₀ K ₂₀ | Сидерат 1*** + гній***, 10 т/га + N ₆₀ P ₅₀ K ₆₀ |
| Гній, 20 т/га | Гній, 20 т/га* | Гній, 20 т/га** | Гній, 20 т/га*** |
| Блок 2 — за використання мікробних препаратів | | | |
| Аналогічні варіанти удобрення | | | |

однаковими: без добрив (контроль); $N_{60}P_{50}K_{60}$; проміжний сидерат (люпин вузьколистий) + $N_{60}P_{50}K_{60}$; проміжний сидерат (жито озиме) + $N_{60}P_{50}K_{60}$; гній, 10 т/га + $N_{60}P_{50}K_{60}$; проміжний сидерат (люпин вузьколистий) + гній, 10 т/га + $N_{60}P_{50}K_{60}$; гній, 20 т/га.

Мінеральні добрива застосовували у вигляді аміачної селітри (д. р. 34,5 %), суперфосфату простого гранульованого (д. р. 19,5 %) та калію хлористого (д. р. 60 %), під картоплю — калію сірчаноокислого (д. р. 56 %). Фосфорні й калійні добрива вносили під основний обробіток, азотні — в передпосівну культивування та підживлення.

Підстилковий гній великої рогатої худоби (ВРХ) у середньому містив поживних речовин: 0,50 % N, 0,25 % P_2O_5 і 0,60 % K_2O . Гній вносили пізно восени.

Як зелене добриво використовували фітомасу люпину вузьколистого й жита озимого, висіяних як проміжні культури після збирання озимих на зерно. Посів люпину й жита озимого проводили в першу декаду серпня. Урожайність сидератів коливалася від 18,5 до 22,2 т/га, що в середньому за роки досліджень становило приблизно 20 т/га або 5 т/га сівозмінної площі. У варіантах із сидератами та гноєм проводили дискування на зиму в другій декаді листопада, після чого проводили зяблеву оранку.

У досліді вирощували такі сорти сільськогосподарських культур: кукурудза — Атракт (гібрид); пшениця яра — Рання-93; конюшина — Атлас; пшениця озима — Поліська-90; картопля — Белароза; овес — Парламентський; люпин вузьколистий — Чернігівець; жито озиме — Синтетик-38.

Для інокуляції посівного / посадкового матеріалу використовували біопрепарати, створені в ІСМАВ: для пшениці озимої, пшениці ярої та кукурудзи — Поліміксобактерин (на основі рістстимуляторної й фосфатмобілізівної бактерії *Paenibacillus polytuxa* KB); для конюшини — Ризобофіт (на основі *Rhizobium leguminosarum* sv. *trifolii* 348a); для жита озимого — Діазобактерин (на основі *Azospirillum brasilense* 18-2); для картоплі — Біогран (на основі *Azospirillum brasilense* 410 і фізіологічно активних речовин біологічного походження), для вівса — Мікрогумін (на основі *Azospirillum brasilense* 410); для люпину вузьколистого — Ризогумін (на основі *Bradyrhizobium lupini* 5500/4). Препара-

рати застосовували відповідно до рекомендацій [31].

Облік урожаю здійснювали з кожної ділянки. Отримані результати перераховували на гектарну площу.

Продуктивність сівозмін у кормових одиницях (к. о.) розраховували, беручи до уваги урожайність культур і відповідні коефіцієнти: для пшениць озимої та ярої — 1,2; кукурудзи — 1,34; конюшини — 0,2; жита озимого — 1,18; картоплі — 0,3; вівса — 1,0; люпину — 1,16 [32].

Статистичну обробку експериментальних даних проводили за використання дисперсійного аналізу й програмних засобів Microsoft Excel.

Результати та їх обговорення. Як свідчать отримані результати, урожайність культур у зерновій сівозміні суттєво залежала від застосованих у досліді систем удобрення (табл. 3). Так, за внесення до ґрунту мінеральних добрив урожайність зерна кукурудзи зростала на 72 %. Застосування туків по фону люпинового сидерату сприяло підвищенню урожайності культури на 115 %. Децю менший ефект отримано за поєднання злакового сидерату з $N_{60}P_{50}K_{60}$. Цікаво, що за внесення 10 т/га гною і мінеральних добрив урожайність культури практично була такою ж, як і у варіантах із поєднанням сидератів з мінеральними добривами. Найбільшою мірою врожайність кукурудзи зростала у варіанті «сидерат (люпин) + гній, 10 т/га + $N_{60}P_{50}K_{60}$ » — на 144 %, якщо порівнювати з показником контрольного варіанту. Ефективність передпосівної інокуляції насіння кукурудзи була високою у варіантах з мінеральним удобренням і за поєднання туків із зеленими добривами. В інших варіантах ефективність мікробних препаратів була статистично недостовірною.

При вирощуванні другої в сівозміні культури — пшениці ярої — також відзначено достовірні зміни за мінерального удобрення. У варіантах, де вносили мінеральні добрива по фону першого року післядії обох видів сидеральних культур, відзначено зростання урожайності — як у порівнянні з контролем, так і з показником варіанту із внесенням лише туків (табл. 3). Урожайність пшениці ярої значно зростала по фону першого року післядії 20 т/га гною, а також при застосуванні $N_{60}P_{50}K_{60}$ по фону першого року післядії

Таблиця 3. Урожайність культур зернової сівозміни за різних систем удобрення та інокуляції насіння, т/га (середнє за 2016–2020 рр.)

| Варіанти дослідів | Кукурудза | | Пшениця яра | | Конюшина | | Пшениця озима | |
|---|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | I* | II** | I | II | I | II | I | II |
| | приріст від інокуляції, % | приріст від інокуляції, % | приріст від інокуляції, % | приріст від інокуляції, % | приріст від інокуляції, % | приріст від інокуляції, % | приріст від інокуляції, % | приріст від інокуляції, % |
| Контроль (без добрив) | 3,29 | 3,57 | 1,24 | 1,35 | 10,70 | 12,31 | 1,85 | 2,18 |
| N ₆₀ P ₅₀ K ₆₀ | 5,66 | 6,51 | 2,20 | 2,35 | 18,30 | 21,41 | 3,13 | 3,24 |
| Сидерат (люпин) + N ₆₀ P ₅₀ K ₆₀ | 7,08 | 8,35 | 2,71 | 2,90 | 18,08 | 21,42 | 3,30 | 3,87 |
| Сидерат (жито) + N ₆₀ P ₅₀ K ₆₀ | 6,85 | 8,01 | 2,64 | 2,83 | 20,83 | 24,68 | 3,47 | 3,90 |
| Гній, 10 т/га + N ₆₀ P ₅₀ K ₆₀ | 6,91 | 7,08 | 3,29 | 3,46 | 22,00 | 23,98 | 3,97 | 4,33 |
| Сидерат (люпин) + гній, 10 т/га + N ₆₀ P ₅₀ K ₆₀ | 8,02 | 8,25 | 3,49 | 3,68 | 26,33 | 29,75 | 4,44 | 4,99 |
| Гній, 20 т/га | 7,48 | 7,66 | 2,88 | 3,05 | 22,65 | 24,01 | 4,27 | 4,82 |
| НІР ₀₅ по досліді | 0,54 | | 0,26 | | 0,90 | | 0,20 | |
| НІР ₀₅ для добрив | 0,28 | | 0,13 | | 0,49 | | 0,09 | |
| НІР ₀₅ для інокуляції | 0,27 | | 0,13 | | 0,45 | | 0,10 | |

Примітка. Тут і в табл. 2–3: I — без інокуляції, II — з інокуляцією.

10 т/га гною. Проте найбільший рівень урожайності культури відзначено у варіанті, де мінеральні добрива застосовували по фоні першого року післядії гною в поєднанні з люпиновим сидератом. Передпосівна інокуляція пшениці сприяла достовірному зростанню врожайності культури, найбільшою мірою у контролі та у варіантах із туками і люпиновим сидератом.

Серед досліджених систем удобрення конюшина найкраще реагувала на другого року післядію житнього сидерату в поєднанні з прямою дією мінеральних добрив — приріст склав 94 %; післядію 10 т/га гною в поєднанні з $N_{60}P_{50}K_{60}$ — зростання врожайності на 106 %, а також на другого року післядію 20 т/га гною — приріст у середньому за роки досліджень дорівнював 112 %.

Проте найбільшу урожайність культури відзначено у варіанті «другого року післядія люпинового сидерату + другого року післядія 10 т/га гною + $N_{60}P_{50}K_{60}$ » — приріст урожайності був на рівні 146 %.

Інокуляція Ризобофітом позитивно позначалася на формуванні врожайності культури у всіх варіантах дослідження, проте найменшою мірою у варіантах із післядією гною (табл. 3).

За вирощування після конюшини наступної в сівозміні культури — пшениці озимої — відзначено суттєве збільшення врожайності за внесення мінеральних добрив — у середньому за роки досліджень на 69 %. Третього року післядії обох видів сидератів у поєднанні з туками ще достовірно позначалася на зростанні урожайності пшениці, особливо за використання Поліміксобактерину по зазначених агрофонах (табл. 3).

Третього року післядії 20 т/га гною, так само як і післядії 10 т/га гною в поєднанні з прямою дією мінеральних добрив, сприяла достовірному зростанню урожайності культури, причому таке поєднання було доволі ефективним, якщо порівнювати з урожайністю пшениці у варіанті з $N_{60}P_{50}K_{60}$. Як і для попередніх у сівозміні культур, найвищі показники врожайності пшениці відзначено у варіанті, де поєднували люпиновий сидерат з 10 т/га гною і мінеральні добрива — урожайність зростала на 140 %. Ефективність передпосівної інокуляції насіння найбільшою мірою проявлялася у варіантах третього

року післядії обох видів сидератів у поєднанні з прямою дією $N_{60}P_{50}K_{60}$.

Оцінюючи загалом ефективність систем удобрення в досліджуваній зерновій сівозміні, варто особливо відзначити високі прирости врожайності всіх культур за їх вирощування по фоні прямої дії та післядії проміжних сидеральних культур у поєднанні з мінеральними добривами, що повністю підтверджує висновки інших дослідників [33; 34]. Кращою сидеральною культурою в досліді, безперечно, був люпин вузьколистий, проте ефективність жита озимого як проміжного сидерата також була доволі високою. Враховуючи вартість насіння люпину й жита озимого, компроміс у виборі між цими сидеральними культурами може виявитися на користь останнього.

Оцінюючи ефективність проміжних сидератів, варто також відзначити їхню пролонговану дію: навіть третього року післядії зелених добрив позначалася на зростанні урожайності пшениці озимої.

Застосування мікробних препаратів для передпосівної інокуляції насіння загалом було ефективним для всіх досліджених культур, проте прирости урожайності від цього агрозаходу залежали від систем удобрення. Так, найбільші прирости, незалежно від використання біопрепаратів, спостерігали при вирощуванні культур по фонах мінеральних добрив, а також за поєднання туків із зеленими добривами.

Дослідження, проведені в зерно-картопляній сівозміні, демонструють різну реакцію сільськогосподарських культур на досліджувані системи удобрення (табл. 4).

Картопля, відома своїми вимогами до кореневого живлення [35], забезпечувала потужні прирости у всіх варіантах із внесенням гною, а також при вирощуванні по фоні обох видів проміжних сидератів у поєднанні з мінеральними добривами.

Найменший приріст урожайності культури (92 %) спостерігали у варіанті з мінеральними добривами у нормі $N_{60}P_{50}K_{60}$, що свідчить про недостатність забезпечення рослин поживними речовинами для реалізації потенціалу продуктивності. Найкращі умови живлення рослин формувалися у варіанті «сидерат (люпин) + гній, 10 т/га + $N_{60}P_{50}K_{60}$ » — приріст урожайності до контролю сягав 149 %.

Таблиця 4. Урожайність культур зерно-картопляної сівозміни за різних систем удобрення та інокуляції насіння, т/га (середнє за 2016–2020 рр.)

| Варіанти дослідів | Картопля | | Овес | | Люпин вузьколистий | | Жито озиме | | | | | |
|---|----------|-------|---------------------------|------|--------------------|---------------------------|------------|------|---------------------------|------|------|------|
| | I | II | приріст від інокуляції, % | I | II | приріст від інокуляції, % | I | II | приріст від інокуляції, % | | | |
| Без добрив, контроль | 8,93 | 9,80 | 9,7 | 1,38 | 1,54 | 11,6 | 1,70 | 1,89 | 11,2 | 1,50 | 1,74 | 16,0 |
| N ₆₀ P ₅₀ K ₆₀ | 17,15 | 18,91 | 10,3 | 2,97 | 3,29 | 10,8 | 2,12 | 2,40 | 13,2 | 3,37 | 3,70 | 9,8 |
| Сидерат (люпин) + N ₆₀ P ₅₀ K ₆₀ | 18,49 | 20,79 | 12,4 | 3,19 | 3,59 | 12,5 | 2,36 | 2,7 | 14,4 | 3,78 | 4,24 | 12,2 |
| Сидерат (жито) + N ₆₀ P ₅₀ K ₆₀ | 18,53 | 20,77 | 12,1 | 3,14 | 3,52 | 12,1 | 2,34 | 2,65 | 13,2 | 3,61 | 4,05 | 12,2 |
| Гній, 10 т/га + N ₆₀ P ₅₀ K ₆₀ | 20,76 | 22,89 | 10,3 | 3,21 | 3,53 | 10,0 | 2,46 | 2,79 | 13,4 | 4,20 | 4,61 | 9,8 |
| Сидерат (люпин) + гній, 10 т/га + N ₆₀ P ₅₀ K ₆₀ | 22,24 | 25,04 | 12,6 | 3,82 | 4,34 | 13,6 | 2,78 | 3,2 | 15,1 | 4,38 | 4,93 | 12,6 |
| Гній, 20 т/га | 18,82 | 20,42 | 8,5 | 2,95 | 3,32 | 12,5 | 2,62 | 2,92 | 11,5 | 3,72 | 4,05 | 8,9 |
| НІР ₀₅ по досліді | 0,94 | | | 0,16 | | | 0,12 | | | 0,19 | | |
| НІР ₀₅ для добрив | 0,49 | | | 0,08 | | | 0,06 | | | 0,09 | | |
| НІР ₀₅ для інокуляції | 0,47 | | | 0,08 | | | 0,07 | | | 0,10 | | |

По цьому агрофону отримано також і найбільші прирости врожайності від застосування для передпосадкової інокуляції мікробного препарату Біограну — якщо порівняти показники з абсолютним контролем, приріст у середньому за роки досліджень був на рівні 180 %. Найнижчі прирости від інокуляції отримано при вирощуванні культури по фону 20 т/га гною (табл. 4), що узгоджується з результатами досліджень інших авторів щодо особливих аспектів такого поєднання [25].

За вирощування наступної в сівозміні культури — вівса — відзначаємо значні прирости врожайності за внесення мінеральних добрив по фону першого року післядії органічних добрив, як гною, так і сидератів обох видів (табл. 2). Найбільші рівні врожайності відзначено за комплексного удобрення — післядія люпинового сидерату та 10 т/га гною в поєднанні з $N_{60}P_{50}K_{60}$. Застосування для передпосівної інокуляції насіння вівса мікробного препарату Мікрогуміну забезпечувало достовірні прирости врожайності культури при вирощуванні по всіх досліджуваних агрофонах — прирости були в межах 10–13 % (табл. 2). Найбільшу ефективність біопрепарату спостерігали у варіанті «післядія люпинового сидерату + післядія 10 т/га гною + $N_{60}P_{50}K_{60}$ ».

Аналогічні вищеописаним залежності формування урожайності від систем удобрення спостерігали і при вирощуванні третьої в сівозміні культури — люпину вузьколистого на зерно. Ефективність інокуляції Ризогуміном була доволі високою — в межах 13–15 %.

Для четвертої в сівозміні культури — жита озимого — найбільш сприятливими були органо-мінеральні агрофони (табл. 4). Високі показники врожайності культури отримано у варіанті «третього року післядія 10 т/га гною + $N_{60}P_{50}K_{60}$ ». Проте найбільші прирости відзначено за внесення мінеральних добрив по фону післядії гною з люпиновим сидератом — 192 %.

Інокуляція Діазобактерином найбільшою мірою позначилася на урожайності жита у контрольному варіанті.

Серед досліджених систем удобрення сприятливим для прояву ефективності біопрепарату було застосування мінеральних

добрив по фону післядії сидеральних культур, а також за внесення туків по фону третього року післядії 10 т/га гною в поєднанні з люпиновим сидератом (табл. 4).

Оцінити загалом продуктивність сівозмін залежно від досліджуваних чинників допомагає аналіз їхньої продуктивності, виражений у кормових одиницях. Як можемо бачити з табл. 5, продуктивність обох сівозмін відрізнялася залежно від систем удобрення, проте можна зробити також і узагальнені висновки. Так, найбільш впливовим є поєднання органічних добрив з мінеральними. До того ж, якщо вплив гною на урожайність сільськогосподарських культур є загальновідомим, то сидеральні культури ще не сприймаються аграріями як потужний інструмент дії на ефективну родючість ґрунтів. У нашому досліді вплив обох видів проміжних сидератів у поєднанні з мінеральними добривами на продуктивність агроценозів практично наближався до дії 10 т/га гною ВРХ в поєднанні з аналогічною нормою туків. Іншими словами, вплив сидератів був еквівалентним дії 10 т/га гною. Удобрювальний потенціал досліджуваних систем ще більшою мірою реалізувався за поєднання сидератів, гною і мінеральних добрив. За цих умов для обох сівозмін спостерігали найвищу продуктивність.

Ефективність інокуляції в досліді була найвищою по фонах, де поєднували сидерати з мінеральними добривами. Водночас варто відзначити, що інокуляція забезпечувала одні з найменших прирости врожайності культур у зерновій сівозміні за їх вирощування по фону 20 т/га гною ВРХ. У картопляно-зерновій сівозміні негативний ефект гною на прояв ефективності біопрепаратів дещо згладжувався.

Висновки. Вплив проміжних сидератів (люпин вузьколистий, жито озиме) на формування продуктивності сівозмін за вирощування сільськогосподарських культур на дерново-підзолистому ґрунті за ефективністю наближається до 10 т/га гною ВРХ. Як для зернової, так і для картопляно-зернової сівозмін застосування мінеральних добрив бажано здійснювати по фону дії та післядії проміжних сидератів або/та 10 т/га підстилкового гною ВРХ. За відсутності в господарствах гною, реальною альтернативою цьому

Таблиця 5. Продуктивність культур залежно від сівозмін, систем удобрення та інокуляції (середнє за 2016–2020 рр.)

| Варіанти дослідів | Продуктивність, середнє по сівозміні, т к. од./га | | ± до контролю (без добрив), т к. од./га / % | | Приріст від інокуляції залежно від агрофону, т к. од./га / % |
|---|---|------|---|------------|--|
| | I | II | I | II | |
| | Зернова сівозмiна | | | | |
| Без добрив, контроль | 2,56 | 2,87 | – | 0,31 / 12 | 0,31 / 12 |
| N ₆₀ P ₅₀ K ₆₀ | 4,41 | 4,93 | 1,85 / 72 | 2,37 / 93 | 0,52 / 12 |
| Сидерат (люпин) + N ₆₀ P ₅₀ K ₆₀ | 5,08 | 5,90 | 2,52 / 98 | 3,34 / 130 | 0,82 / 16 |
| Сидерат (жито) + N ₆₀ P ₅₀ K ₆₀ | 5,17 | 5,94 | 2,61 / 102 | 3,38 / 132 | 0,77 / 15 |
| Гній, 10 т/га + N ₆₀ P ₅₀ K ₆₀ | 5,59 | 5,91 | 3,03 / 118 | 3,35 / 131 | 0,32 / 6 |
| Сидерат (люпин) + гній, 10 т/га + N ₆₀ P ₅₀ K ₆₀ | 6,38 | 6,85 | 3,82 / 149 | 4,29 / 168 | 0,47 / 7 |
| Гній, 20 т/га | 5,78 | 6,13 | 3,22 / 126 | 3,57 / 139 | 0,35 / 6 |
| Зерно-картопляна сівозмiна | | | | | |
| Без добрив, контроль | 1,95 | 2,18 | – | 0,23 / 12 | 0,23 / 12 |
| N ₆₀ P ₅₀ K ₆₀ | 3,64 | 4,03 | 1,69 / 87 | 2,08 / 107 | 0,39 / 11 |
| Сидерат (люпин) + N ₆₀ P ₅₀ K ₆₀ | 3,98 | 4,49 | 2,03 / 104 | 2,54 / 130 | 0,51 / 13 |
| Сидерат (жито) + N ₆₀ P ₅₀ K ₆₀ | 3,92 | 4,40 | 1,97 / 101 | 2,45 / 127 | 0,48 / 12 |
| Гній, 10 т/га + N ₆₀ P ₅₀ K ₆₀ | 4,31 | 4,77 | 2,36 / 121 | 2,82 / 145 | 0,46 / 11 |
| Сидерат (люпин) + гній, 10 т/га + N ₆₀ P ₅₀ K ₆₀ | 4,72 | 5,35 | 2,77 / 142 | 3,40 / 174 | 0,63 / 13 |
| Гній, 20 т/га | 4,01 | 4,40 | 2,06 / 105 | 2,45 / 126 | 0,39 / 10 |

традиційному виду добрив є проміжні сидерати, особливо за введення до технологій вирощування сільськогосподарських культур мікробних препаратів.

Використання мікробних препаратів сприяє суттєвому зростанню продуктивності агроценозів, проте ефективність передпосівної інокуляції насіння залежить від систем удобрення. Застосування біопрепаратів потужно впливає на урожайність за вирощування сільськогосподарських культур по мінеральних агрофонах, за дії та післядії проміжних сидератів та за поєднання туків із сидератами. Дія інокулянтів на продуктивність агроценозів значною мірою нівелюється за внесення до ґрунту гною, що необхідно враховувати при плануванні систем удобрення.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Yu C., Huang X., Chen H., Godfray H. C. J., Wright J. S., Hall J. ... Taylor J. Managing nitrogen to restore water quality in China. *Nature*. 2019. Vol. 567, № 7749. P. 516–520. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1001-1>
2. Sud M. Managing the biodiversity impacts of fertilizer and pesticide use: Overview and insights from trends and policies across selected OECD countries (OECD Environment Working Papers. № 155. Paris : OECD Publishing, 2020. 61 p. <https://doi.org/10.1787/63942249-en>
3. Tyagi J., Ahmad S., Malik M. Nitrogenous fertilizers: impact on environment sustainability, mitigation strategies, and challenges. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2022. Vol. 19, № 11. P. 11649–11672. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04027-9>
4. Babalola O. O. Beneficial bacteria of agricultural importance. *Biotechnology Letters*. 2010. Vol. 32, № 11. P. 1559–1570. <https://doi.org/10.1007/s10529-010-0347-0>
5. Bashan Y., de-Bashan L. E. How the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum* promotes plant growth — a critical assessment. *Advances in Agronomy*. 2010. Vol. 108. P. 77–136. [https://doi.org/10.1016/s0065-2113\(10\)08002-8](https://doi.org/10.1016/s0065-2113(10)08002-8)
6. Hungria M., Campo R. J., Souza E. M., Pedrosa F. O. Inoculation with selected strains of *Azospirillum brasilense* and *A. lipoferum* improves yields of maize and wheat in Brazil. *Plant and Soil*. 2010. Vol. 331, № 1–2. P. 413–425. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0262-0>
7. Santos M. S., Nogueira M. A., Hungria M. Microbial inoculants: reviewing the past, discussing the present, and previewing an outstanding future for the use of beneficial bacteria in agriculture. *AMB Express*. 2019. Vol. 9, № 1. <https://doi.org/10.1186/s13568-019-0932-0>
8. Мікробні препарати у землеробстві. Теорія і практика / за ред. В. В. Волкогона. Київ, 2006. 312 с.
9. Методологія і практика використання мікробних препаратів у технологіях вирощування сільськогосподарських культур / за ред. В. В. Волкогона. Київ, 2011. 156 с.
10. Calvo P., Nelson L., Kloeper J. W. Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil*. 2014. Vol. 383, № 1–2. P. 3–41. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2131-8>
11. Singh B. K., Trivedi P. Microbiome and the future for food and nutrient security. *Microbial Biotechnology*. 2017. Vol. 10, № 1. P. 50–53. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12592>
12. Lopes M. J. D. S., Dias-Filho M. B., Gurgel E. S. C. Successful plant growth-promoting microbes: inoculation methods and abiotic factors. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2021. Vol. 5. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.606454>
13. Волкогон В. В. Значення мікроорганізмів для здоров'я ґрунтів та оптимізації формування біоценозів. *Фізіологія рослин і генетика*. 2024. № 1. С. 3–25. <https://doi.org/10.15407/frg2024.01.003>
14. Murty M. G., Ladha J. K. Influence of *Azospirillum* inoculation on the mineral uptake and growth of rice under hydroponic conditions. *Plant and Soil*. 1998. Vol. 108, № 2. P. 281–285. <https://doi.org/10.1007/bf02375660>
15. Волкогон В. В. Мікробні препарати як фактор підвищення засвоюваності рослинами мінеральних добрив. *Сільськогосподарська мікробіологія*. 2006. Вип. 4. С. 21–30. <https://doi.org/10.35868/1997-3004.4.21-30>
16. Ardakani M., Mafakheri S. Designing a sustainable agroecosystem for wheat (*Triticum aestivum* L.) production. *Journal of Applied Environmental and Biological Science*. 2011. Vol. 1. P. 401–413.
17. Meena V. S., Maurya B. R., Verma J. P. Does a rhizospheric microorganism enhance K⁺ availability in agricultural soils? *Microbiological Research*. 2014. Vol. 169, № 5–6. P. 337–347. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2013.09.003>
18. Mimmo T., Del Buono D., Terzano R., Tomasi N., Vigani G., Crecchio C. ... Cesco S. Rhizospheric organic compounds in the soil–microorganism–plant system: their role in iron availability. *European Journal of Soil Science*. 2014. Vol. 65, № 5. P. 629–642. <https://doi.org/10.1111/ejss.12158>
19. Oger P. M., Mansouri H., Nesme X., Desaux Y. Engineering root exudation of Lotus toward the production of two novel carbon compounds leads to the selection of distinct microbial populations in the rhizosphere. *Microbial Ecology*. 2004. Vol. 47, № 1. P. 96–103. <https://doi.org/10.1007/s00248-003-2012-9>

20. Blagodatskaya E., Littschwager J., Laurer M., Kuzyakov Y. Growth rates of rhizosphere microorganisms depend on competitive abilities of plants and N supply. *Plant Biosystems*. 2010. Vol. 144, № 1. P. 408–413. <https://doi.org/10.1080/11263501003718596>
21. Glick B. R. Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. *Scientifica (Cairo)*. 2012. Vol. 2012. <https://doi.org/10.6064/2012/963401>
22. Волкогон В. В. Мікробіологічні аспекти оптимізації азотного удобрення сільськогосподарських культур. К. : Аграрна наука. 2007. 144 с.
23. Ozturk A., Caglar O., Sahin F. Yield response of wheat and barley to inoculation of plant growth promoting Rhizobacteria at various levels of nitrogen fertilization. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2003. Vol. 166, № 2. P. 262–266. <https://doi.org/10.1002/jpln.200390038>
24. Shaharooma B., Naveed M., Arshad M., Zahir Z. A. Fertilizer-dependent efficiency of Pseudomonads for improving growth, yield, and nutrient use efficiency of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2008. Vol. 79, № 1. P. 147–155. <https://doi.org/10.1007/s00253-008-1419-0>
25. Sydorenko V. P., Volkogon V. V., Dimova S. B., Volkogon K. I., Lutsenko N. V., Shtanko N. P., Zemska I. A. Efficiency of pre-sowing inoculation in cultivation of agricultural crops under different organic agrarian backgrounds. *Сільськогосподарська мікробіологія*. 2020. Вип. 32. С. 18–30. <https://doi.org/10.35868/1997-3004.32.18-34>
26. Volkogon V. V., Dimova S. B., Volkogon K. I., Sidorenko V. P., Volkogon M. V. Biological Nitrogen Fixation and Denitrification in Rhizosphere of Potato Plants in Response to the Fertilization and Inoculation. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2021. Vol. 5. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.606379>
27. Волкогон В. В., Дімова С. Б., Волкогон К. І., Сидоренко В. П. Ефективність мікробних препаратів за різних систем удобрення сільськогосподарських культур. *Вісник аграрної науки*. 2020. № 6. С. 5–13. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202006-01>
28. Sanzovo A. W. S., Silvestre D. A., Goes K. C. G. P., Volsi B., Constantino L. V., Bordin I. ... Andrade D. S. Crop rotation and inoculation increase soil Bradyrhizobia population, soybean grain yields, and profitability. *Brazilian Journal of Microbiology*. 2023. Vol. 54, № 4. P. 3187–3200. <https://doi.org/10.1007/s42770-023-01148-2>
29. Zhou Y., Yang Z., Liu J., Li X., Wang X., Dai C. ... Li X. Crop rotation and native microbiome inoculation restore soil capacity to suppress a root disease. *Nature Communications*. 2023. Vol. 14, № 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43926-4>
30. Li Y., Laterrière M., Lay C.-Y., Klabi R., Masse J., St-Arnaud M. ... Hamel C. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation and crop sequence on root-associated microbiome, crop productivity and nutrient uptake in wheat-based and flax-based cropping systems. *Applied Soil Ecology*. 2021. Vol. 168. 104136. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104136>
31. Мікробні препарати в сучасних аграрних технологіях. Науково-практичні рекомендації / за ред. В. В. Волкогона. Київ, 2015. 248 с.
32. Державний комітет статистики України. Наказ від 24.01.2008 № 18. Про затвердження Методичних рекомендацій щодо проведення розрахунків витрат кормів сільськогосподарським тваринам у господарствах усіх категорій. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0018202-08#Text>
33. Ефективне використання сидератів у сучасному землеробстві. Науково-практичні рекомендації / за ред. О. М. Берднікова. Чернігів, 2012. 26 с.
34. Культура сидерації / за ред. Е. Г. Дегодюка, С. Ю. Булигіна. Київ : Аграрна наука, 2013. 80 с.
35. Кучко А. А., Власенко М. Ю., Мицько В. М. Фізіологія та біохімія картоплі. К. : Довіра, 1998. 335 с.

Отримано: 12.08.2025

Прийнято до друку: 25.09.2025

Опубліковано онлайн: 29.12.2025

AGROCENOSES PRODUCTIVITY IN THE CULTIVATION OF AGRICULTURAL CROPS UNDER DIFFERENT FERTILIZATION AND INOCULATION SYSTEMS

M. M. Parkhomenko, <https://orcid.org/0000-0001-8804-0813>

Institute of Agricultural Microbiology and Agroindustrial Manufacture, NAAS, Chernihiv
e-mail: miroslav.parkhomenko@gmail.com

Objective. To research the effectiveness of various fertilization systems and pre-sowing inoculation of seeds with microbial preparations in the cultivation of agricultural crops in two types of crop rotations on sod-podzolic soil. **Methods.** Field experiment (long-term stationary field experiment of the Institute of Agricultural Microbiology and Agroindustrial Production of the National Academy of Agrarian Sciences), weighing (for yield accounting), statistical. Crop cultivation technologies typical for the region. The following biological preparations were used for inoculation of sowing/planting material: for winter wheat, spring wheat, and corn — Polymixobacterin (based on *Paenibacillus polymyxa*); for clover — Rhizobofit (based on *Rhizobium leguminosarum* sv. *trifolii*); for winter rye — Diazobakterin (based on *Azospirillum brasilense*); for potatoes — Biogran (based on *Azospirillum brasilense* and physiologically active substances of biological origin), for oats — Microgumin (based on *Azospirillum brasilense*); for narrow-leaved lupine — Rhizogumin (based on *Bradyrhizobium lupini*). **Results.** On average during 2016–2020, high productivity indicators in the studied crop rotations — grain (corn for grain → spring wheat → clover → winter wheat) and potato-grain (potatoes → oats → narrow-leaved lupine for grain → winter rye) were obtained using the average crop rotation rate of mineral fertilizers $N_{60}P_{50}K_{60}$ against the background of direct action and after-effects of intermediate green manure (narrow-leaved lupine and winter rye), as well as the application of mineral fertilizers against the background of the action and after-effects of 10 t/ha of cattle manure. The effectiveness of combining manure with green manure was close to that of using manure in combination with mineral fertilizers. The highest productivity of both crop rotations studied was obtained in the variants where mineral fertilizers were combined with the total effect and after-effect of lupine green manure and manure. The after-effect of the intermediate green manure was observed for three years. The use of microbial preparations provided significant increases in crop rotation productivity. The best way to demonstrate the effectiveness of biological preparations was to use mineral fertilizers against the background of the action and after-effect of intermediate green manure, as well as a combination of 10 t/ha of manure, lupine green manure, and mineral fertilizers at the rate of $N_{60}P_{50}K_{60}$. **Conclusions.** It is advisable to combine mineral fertilizers with the organic ones while growing crops on sod-podzolic soil. Intermediate green manure is a powerful fertilizing agent that can be a significant supplement and even an alternative to 10 t/ha of manure. The use of microbial preparations contributes to a significant increase in the productivity of crop rotations.

Key words: organic and mineral fertilizers, microbial preparations, sod-podzolic soil, feed units.

REFERENCES

1. Yu, C., Huang, X., Chen, H., Godfray, H. C. J., Wright, J. S., Hall, J. ... Taylor, J. (2019). Managing nitrogen to restore water quality in China. *Nature*, 567(7749), 516–520. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1001-1>
2. Sud, M. (2020). Managing the biodiversity impacts of fertilizer and pesticide use: Overview and insights from trends and policies across selected OECD countries. *OECD Environment Working Papers*, 155. Paris: OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/63942249-en>
3. Tyagi, J., Ahmad, S., & Malik, M. (2022). Nitrogenous fertilizers: impact on environment sustainability, mitigation strategies, and challenges. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(11), 11649–11672. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04027-9>

4. Babalola, O. O. (2010). Beneficial bacteria of agricultural importance. *Biotechnology Letters*, 32(11), 1559–1570. <https://doi.org/10.1007/s10529-010-0347-0>
5. Bashan, Y., & de-Bashan, L. E. (2010). How the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum* promotes plant growth — a critical assessment. *Advances in Agronomy*, 108, 77–136. [https://doi.org/10.1016/s0065-2113\(10\)08002-8](https://doi.org/10.1016/s0065-2113(10)08002-8)
6. Hungria, M., Campo, R. J., Souza, E. M., & Pedrosa, F. O. (2010). Inoculation with selected strains of *Azospirillum brasilense* and *A. lipoferum* improves yields of maize and wheat in Brazil. *Plant and Soil*, 331, 413–425. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0262-0>
7. Santos, M. S., Nogueira, M. A., & Hungria, M. (2019). Microbial inoculants: reviewing the past, discussing the present and previewing an outstanding future for the use of beneficial bacteria in agriculture. *AMB Express*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s13568-019-0932-0>
8. Volkogon, V. V. (Ed.). (2006). *Mikrobnii preparaty u zemlerobstvi. Teoriia i praktyka* [Microbial preparations in agriculture: Theory and practice]. Kyiv [in Ukrainian].
9. Volkogon, V. V. (Ed.). (2011). *Metodolohiia i praktyka vykorystannia mikrobnnykh preparativ u tekhnolohiiakh vyroshchuvannia silskohospodarskykh kultur* [Methodology and practice of using microbial preparations in technologies of growing agricultural crops]. Kyiv [in Ukrainian].
10. Calvo, P., Nelson, L., & Kloepper, J. W. (2014). Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil*, 383(1–2), 3–41. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2131-8>
11. Singh, B. K., & Trivedi, P. (2017). Microbiome and the future for food and nutrient security. *Microbial Biotechnology*, 10(1), 50–53. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12592>
12. Lopes, M. J. dos S., Dias-Filho, M. B., & Gurgel, E. S. C. (2021). Successful plant growth-promoting microbes: Inoculation methods and abiotic factors. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 606454. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.606454>
13. Volkogon, V. V. (2024). Znachennia mikroorhanizmiv dlia zdorovia gruntiv ta optymizatsii formuvannia biotsenoziv. [The significance of microorganisms for soil health and optimization of the formation of biocenoses]. *Fiziolohiia roslyn i henytyka — Plant Physiology and Genetics*, 56(1), 3–26. <https://doi.org/10.15407/frg2024.01.003> [in Ukrainian].
14. Murty, M. G., & Ladha, J. K. (1988). Influence of *Azospirillum* inoculation on the mineral uptake and growth of rice under hydroponic conditions. *Plant and Soil*, 108(2), 281–285. <https://doi.org/10.1007/bf02375660>
15. Volkohon, V. V. (2006). Mikrobnii preparaty yak faktor pidvyschennia zasvoiuvanosti roslynamy mineralnykh dobryv [Microbial preparations as a factor in increasing the digestibility of mineral fertilizers by plants]. *Silskohospodarska Mikrobiolohiia — Agricultural Microbiology*, 4, 21–30 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.35868/1997-3004.4.21-30>
16. Ardakani M., & Mafakheri S. (2011). Designing a sustainable agroecosystem for wheat (*Triticum aestivum* L.) production. *Journal of Applied Environmental and Biological Science*, 1, 401–413.
17. Meena, V. S., Maurya, B. R., & Verma, J. P. (2014). Does a rhizospheric microorganism enhance K⁺ availability in agricultural soils? *Microbiological Research*, 169(5–6), 337–347. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2013.09.003>
18. Mimmo, T., Del Buono, D., Terzano, R., Tomasi, N., Vigani, G., Crecchio, C. ... Cesco, S. (2014). Rhizospheric organic compounds in the soil–microorganism–plant system: their role in iron availability. *European Journal of Soil Science*, 65(5), 629–642. <https://doi.org/10.1111/ejss.12158>
19. Oger, P. M., Mansouri, H., Nesme, X., & Dessaux, Y. (2004). Engineering root exudation of Lotus toward the production of two novel carbon compounds leads to the selection of distinct microbial populations in the rhizosphere. *Microbial Ecology*, 47(1), 96–103. <https://doi.org/10.1007/s00248-003-2012-9>
20. Blagodatskaya, E., Littschwager, J., Lauener, M., & Kuzyakov, Y. (2010). Growth rates of rhizosphere microorganisms depend on competitive abilities of plants and N supply. *Plant Biosystems*, 144(2), 408–413. <https://doi.org/10.1080/11263501003718596>
21. Glick, B. R. (2012). Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. *Scientifica (Cairo)*, 2012, 1–15. <https://doi.org/10.6064/2012/963401>
22. Volkogon, V. V. (2007). *Mikrobiolohichni aspekty optymizatsii azotnoho udobrennia silskohospodarskykh kultur* [Microbiological aspects of optimization of nitrogen fertilization of agricultural crops]. Kyiv: Ahrarna nauka [in Ukrainian].
23. Ozturk, A., Caglar, O., & Sahin, F. (2003). Yield response of wheat and barley to inoculation of plant growth promoting Rhizobacteria at various levels of nitrogen fertilization. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 166(2), 262–266. <https://doi.org/10.1002/jpln.200390038>
24. Shaharoon, B., Naveed, M., Arshad, M., & Zahir, Z. A. (2008). Fertilizer-dependent efficiency of Pseudomonads for improving growth, yield, and nutrient use efficiency of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Applied Microbiology and Biotechnology*, 79(1), 147–155. <https://doi.org/10.1007/s00253-008-1419-0>

25. Sydorenko, V. P., Volkogon, V. V., Dimova, S. B., Volkogon, K. I., Lutsenko, N. V., Shtanko, N. P., & Zemska, I. A. (2020). Efficiency of pre-sowing inoculation in cultivation of agricultural crops under different organic agrarian backgrounds. *Silskohospodarska Mikrobiolohiia — Agricultural Microbiology*, 32, 18–30. <https://doi.org/10.35868/1997-3004.32.18-34>
26. Volkogon, V. V., Dimova, S. B., Volkogon, K. I., Sidorenko, V. P., & Volkogon, M. V. (2021). Biological Nitrogen Fixation and Denitrification in Rhizosphere of Potato Plants in Response to the Fertilization and Inoculation. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 606379. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.606379>
27. Volkogon, V. V., Dimova, S. B., Volkogon, K. I., & Sydorenko, V. P. (2020). Efektyvnist mikrobynykh preparativ za riznykh system udobrennia silskohospodarskykh kultur [The efficiency of microbial preparations in different systems of fertilizing crops]. *Visnyk Agrarnoi Nauky — Bulletin of Agricultural Science*, 98(6), 5–14 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202006-01>
28. Sanzovo, A. W. S., Silvestre, D. A., Goes, K. C. G. P., Volsi, B., Constantino, L. V., Bordin, I. ... Andrade, D. S. (2023). Crop rotation and inoculation increase soil Bradyrhizobia population, soybean grain yields, and profitability. *Brazilian Journal of Microbiology*, 54(4), 3187–3200. <https://doi.org/10.1007/s42770-023-01148-2>
29. Zhou, Y., Yang, Z., Liu, J., Li, X., Wang, X., Dai, C. ... Li, X. (2023). Crop rotation and native microbiome inoculation restore soil capacity to suppress a root disease. *Nature Communications*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43926-4>
30. Li, Y., Laterrière, M., Lay, C.-Y., Klabi, R., Masse, J., St-Arnaud, M. ... Hamel, C. (2021). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation and crop sequence on root-associated microbiome, crop productivity and nutrient uptake in wheat-based and flax-based cropping systems. *Applied Soil Ecology*, 168, 104136. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104136>
31. Volkohon, V. V. (Ed.). (2015). *Mikrobnii preparaty v suchasnykh ahrarnykh tekhnolohiiakh. Naukovo-praktychni rekomendatsii* [Microbial preparations in modern agricultural technologies. Scientific and practical guidans]. Kyiv [in Ukrainian].
32. Derzhavnyi komitet statystyky Ukrainy. Nakaz 24.01.2008 № 18. *Pro zatverdzhennia Metodichnykh rekomendatsii shchodo provedennia rozrakhunkiv vytrat kormiv silskohospodarskym tvarynam u gospodarstvakh usikh katehorii*. [State Statistics Committee of Ukraine. Order of January 24, 2008 No. 18. On approval of Methodological recommendations for calculating feed costs for farm animals in farms of all categories]. [in Ukrainian]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0018202-08#Text>
33. Berdnikov, O. M. (Ed.). (2012). *Efektivne vykorystannia syderativ u suchasnomu zemlerobstvi. Naukovo-praktychni rekomendatsii* [Effective use of green manures in modern agriculture. Scientific and practical guidans]. Chernihiv [in Ukrainian].
34. Degodyuk, E. G., Bulygin, S. Yu. (Eds.). (2013) *Kultura syderatsii* [Culture of sideration]. Kyiv: Ahrarna nauka [in Ukrainian].
35. Kuchko, A. A., Vlasenko, M. Yu., Mytsko, V. M. (1998) *Fiziolohiia ta biokhimiia kartopli* [Physiology and Biochemistry of Potatoes]. Kyiv: Dovira [in Ukrainian].

Received: 12.08.2025

Accepted: 25.09.2025

Published online: 29.12.2025