

ЕФЕКТИВНІСТЬ БІОЛОГІЧНО МОДИФІКОВАНОЇ АЗОФОСКИ ЗА ВИРОЩУВАННЯ ПШЕНИЦІ ОЗИМОЇ

В. В. Глушаков, <https://orcid.org/0009-0002-5472-3303>,

В. В. Волкогон, <https://orcid.org/0000-0003-0675-1318>,

Т. С. Сасіна, <https://orcid.org/0000-0003-4021-9202>,

С. Б. Дімова, <https://orcid.org/0000-0003-2440-6657>,

К. І. Волкогон, <https://orcid.org/0000-0002-7156-4124>,

Л. А. Шевченко, <https://orcid.org/0000-0002-2637-1999>

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

Мета. Дослідити ефективність мінерального добрива азофоска, збагаченого агрономічно цінними бактеріями, за вирощування пшениці озимої на чорноземі вилугуваному. **Методи.** Мікробіологічні (вирощування бактеріальних культур, збагачення мінерального добрива, облік чисельності бактерій в інокулюмі, на гранулах добрива та в ризосферному ґрунті рослин); вегетаційного і польового дослідів; аналітичні (визначення вмісту рухомого P_2O_5 у ризосферному ґрунті рослин пшениці, вмісту білка у зерні, масової частки клейковини, маси 1000 зерен), статистичні. **Результати.** Мінеральне добриво азофоска модифікували за участі агрономічно цінних бактерій, здатних оптимізувати продукційний процес пшениці озимої за передпосівної інокуляції насіння. Застосування добрива, збагаченого *Raenibacillus rolytuxa* KB у нормі $N_{60}P_{60}K_{60}$, не забезпечило достовірного збільшення врожайності пшениці, проте сприяло покращенню якісних показників продукції (зростали показники маси 1000 зерен, вмісту білка в продукції). Внесення в ґрунт цього ж виду експериментального добрива у нормі $N_{90}P_{90}K_{90}$ сприяло підвищенню продуктивності на 16,5 %. Застосування добрива, модифікованого за участі *Bacillus amyloliquefaciens* B-22, забезпечувало збільшення врожайності пшениці за вирощування культури по обох фонах — за внесення добрив у нормі $N_{60}P_{60}K_{60}$ на 15,6 % і за норми $N_{90}P_{90}K_{90}$ — на 34,7 %. Суттєво зростали показники маси 1000 зерен, вмісту білка та масової частки клейковини в зерні. **Висновки.** Застосування мікробіологічно модифікованої азофоски для удобрення пшениці озимої сприяє підвищенню урожайності культури й покращенню якості продукції. *B. amyloliquefaciens* B-22 забезпечує інтенсивніший вплив на формування продуктивності пшениці, ніж *R. rolytuxa* KB. Розвиток досліджень у напрямі біологічної модифікації мінеральних добрив і визначення ефективності їх застосування в технологіях удобрення сільськогосподарських культур є перспективним.

Ключові слова: мікробіологічна модифікація мінеральних добрив, агрономічно цінні бактерії, *Raenibacillus rolytuxa*, *Bacillus amyloliquefaciens*.

Вступ. Використання мікроорганізмів, здатних стимулювати ріст рослин (PGPM), у технологіях вирощування сільськогосподарських культур сьогодні стає нормою в землеробстві багатьох країн. Ці мікроорганізми активно колонізують кореневі сфери рослин

і сприяють зростанню врожайності сільськогосподарських культур, активізуючи процеси фіксації атмосферного азоту, солубілізації фосфатів і солей калію, продукуючи сидерофори, фітогормони і 1-аміноциклопропан-1-карбоксилат (ACC) дезамінази, зменшують

шкідливий вплив фітопатогенних організмів або запобігають йому [1–3]. Біологічні препарати на основі PGPM все частіше розглядаються як екологічно обґрунтоване доповнення до традиційних систем удобрення культур для розв'язання проблем продовольчої безпеки та екологічної стійкості аграрного виробництва [4–6]. Водночас ефективність PGPM значною мірою залежить від форми інокулянту й особливостей його застосування [7].

Виробництво інокулянтів для сільськогосподарських культур здебільшого зосереджено на отриманні суспензій бактеріальних культур (зі стимулювальними чи стабілізуювальними добавками або без них) та на їх поєднанні з інертними твердими носіями [4; 8; 9]. Зазвичай зазначені форми інокулянтів використовують для передпосівної обробки насіння. За наявності відповідних механізмів рідкі інокулянти можна також вносити локально, безпосередньо в посівну борозну. Крім зазначених форм препаратів, пропонується також використання мікрокапсуляції та іммобілізації бактеріальних клітин на полімерних матрицях (таких як альгінат, агар, пектин, хітозан, поліакриламід) [10; 11] або високодисперсних глинистих матеріалах [12]. Після інкапсуляції клітини є порівняно захищеними матрицею від механічних пошкоджень і стресів. Повільна деградація матеріалу матриці забезпечує нешвидке й тривале вивільнення мікроорганізмів, що теоретично може сприяти оптимізації формування тісних рослинно-бактеріальних асоціацій [13–15]. За цих умов бактерії також захищені від згубного впливу агрохімікатів на насінні та в ґрунті. На жаль, використання цих технологій є доволі обмеженим через складнощі в їх реалізації.

Дослідження форм і способів застосування мікробних препаратів активно розвиваються. Останнім часом з'явилися повідомлення про ефективність використання мінеральних добрив, збагачених агрономічно цінними мікроорганізмами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Інформація про застосування біологічно модифікованих мінеральних добрив досить обмежена [16–20], зважаючи на те, що дослідження в цьому напрямі розпочаті недавно. Проте наявні публікації свідчать про можливість забезпечення рослин необхідною для

гармонійного росту й розвитку мікробіотою за використання збагачених PGPM добрив. Нашими попередніми дослідженнями показано значні перспективи використання PGPM, ізольованих з поверхні гранул мінеральних добрив, за вирощування картоплі. Так, застосування збагаченого мінерального добрива азофоски представниками роду *Bacillus* (*B. amyloliquefasciens* В-22 і *B. cereus* 3/7) у технологіях вирощування картоплі сорту Белароза сприяло активному розростанню кореневої системи, формуванню потужного фотосинтетичного апарату рослин, збільшенню фосфатсолубілізівної активності в ризосферному ґрунті, що забезпечувало підвищення врожайності культури на 29–39 %, збільшення вмісту крохмалю і зменшення вмісту нітратів у продукції [21].

Вищезазначена інформація свідчить про необхідність розвитку цих досліджень, зокрема і на нових об'єктах. У зв'язку з цим **метою** наших досліджень було визначення ефективності біологічно модифікованих добрив за вирощування пшениці озимої.

Матеріали та методи досліджень. Ефективність біологічно модифікованої азофоски вивчали у 2024–2025 рр. за умов вегетаційного та польового дослідів на чорноземі вилугуваному (рН_{сол.} — 5,3; вміст гумусу — 3,03 %; азоту, що легко гідролізується, — 95 мг/кг ґрунту; рухомих сполук фосфору (P₂O₅) — 150 мг/кг ґрунту (за Кирсановим); вміст обмінного калію (K₂O) (за Кирсановим) — 108 мг/кг ґрунту). У дослідях використовували насіння пшениці озимої сорту Кубус.

У дослідженні використовували два бактеріальні штами. Представник роду *Paenibacillus* — *P. polymyxa* KB (автори — Л. М. Токмакова і В. І. Канівець), ізольований із дерново-підзолистого ґрунту, характеризується високою фосфатсолубілізівною активністю, а також інтенсивним продукуванням фітогормонів. На основі зазначеного штаму створено мікробний препарат Поліміксобактерин, який сприяє зростанню врожайності сільськогосподарських культур, зокрема пшениці озимої [4]. Штам депоновано в Колекції мікроорганізмів Інституту мікробіології і вірусології ім. Д. К. Заболотного НАН України (ІМВ) під номером ІМВ В-8059.

Інший бактеріальний штам — *B. amyloliquefasciens* В-22 ізольовано Т. С. Сасіною

з поверхні гранул мінерального добрива азофоски. Бактерія характеризується такими властивостями, як рістстимуляція, фосфатсолюбілізація, проявляє антифунгальні властивості [21]. Штам депоновано в Колекції ІМВ під номером ІМВ-В-8120. Вибір зазначеного штаму зумовлений його високою ефективністю за використання для передпосівної інокуляції насіння пшениці озимої, що підтверджено в польових умовах [22]. Крім того, *B. amyloliquefaciens* В-22 характеризується високим ступенем виживання на гранулах мінеральних добрив. Також показано високу ефективність азофоски, модифікованої за участі цієї бактерії за вирощування картоплі [21].

Для отримання інокулюму зазначені бактерії вирощували на МПА протягом 72 годин за температури 28 °С, після чого біомасу змивали стерильною водою. Титр бактеріальних суспензій визначали шляхом мікроскопії за використання камери Горяєва та за висіву розведень суспензії на МПА. Отримані суспензії наносили на гранули добрива азофоска. Застосовані об'єми суспензій мікроорганізмів складали 2 % від маси добрива (такий об'єм був необхідний для рівномірного нанесення мікроорганізмів на гранули мінеральних добрив). Розрахункова кількість бактеріальних клітин на гранулах добрив була в межах $2,5\text{--}3,0 \times 10^7$ КУО/г. Добриво для контрольних варіантів для чистоти експерименту обробляли водою. Отримані таким чином варіанти збагаченої азофоски підсушували протягом 24 годин за кімнатної температури і вносили в ґрунт перед посівом відповідно до схем вегетаційного і польового дослідів. Крім того, у вегетаційному досліді суспензію бактерій у відповідних варіантах (для порівняння) використовували для передпосівної інокуляції насіння пшениці озимої, забезпечуючи бактеріальне навантаження з розрахунку 0,5 млн клітин/насінину.

Схема вегетаційного досліді:

- 1) контроль;
- 2) передпосівна інокуляція насіння *B. amyloliquefaciens* В-22;
- 3) передпосівна інокуляція насіння *P. polymyxa* КВ;
- 4) добриво, збагачене *B. amyloliquefaciens* В-22;
- 5) добриво, збагачене *P. polymyxa* КВ.

Як добриво для всіх варіантів вегетаційного досліді використовували азофоску

(вміст NPK — по 16 %) із розрахунку $N_{60}P_{60}K_{60}$ на 1 га (розрахунок здійснювали, беручи до уваги масу ґрунту на 1 га у шарі 0–20 см — 3 500 000 кг/га). У варіантах 1–3 використовували не збагачене добриво, а у варіантах 4 і 5 — азофоску, модифіковану з використанням бактерій відповідних штамів.

Повторність досліді — шестикратна. Маса ґрунту в кожній посудині — 2 кг.

Рослини вирощували протягом 50 днів, після чого зрізали надземну масу рослин, відмивали коріння, висушували до сталої маси й зважували.

Польовий дослід проводили за схемою, що наведена нижче.

I. Агрофон — $N_{60}P_{30}K_{30}$ (основне внесення $N_{30}P_{30}K_{30} + N_{30}$ навесні):

- 1) контроль (незбагачене добриво);
- 2) добриво, збагачене *B. amyloliquefaciens* В-22;
- 3) добриво, збагачене *P. polymyxa* КВ.

II. Агрофон — $N_{90}P_{60}K_{60}$ (основне внесення $N_{30}P_{30}K_{30} + N_{30}$ навесні + N_{30} у фазу виходу в трубку):

- 4) контроль (незбагачене добриво);
- 5) добриво, збагачене *B. amyloliquefaciens* В-22;
- 6) добриво, збагачене *P. polymyxa* КВ.

Під основне внесення використовували азофоску, для підживлення — аміачну селітру (вміст N — 34 %).

Повторність досліді — чотириразова, площа кожної ділянки — 14,4 м².

Оскільки використані в дослідженні бактерії є активними фосфатсолюбілізаторами, у динаміці визначали чисельність фосфатсолюбілізівних бактерій у ризосферному ґрунті рослин, а також уміст рухомого P_2O_5 за методикою Карпінського та Зам'ятіної [23]. Облік урожаю здійснювали поділянково.

Для визначення якісних показників зерна (натурі, склоподібності, кількості і якості клейковини, числа падіння, вмісту білка) використовували затверджені в Україні державні стандарти, що діяли на момент проведення досліджень [24–29].

Відмінності між показниками варіантів при визначенні маси рослин у вегетаційному досліді, вмісту рухомого P_2O_5 у ризосферному ґрунті, чисельності бактерій, здатних розчиняти мінеральні сполуки фосфору, а також показників якості продукції оцінювали за використання середнього арифметичного

значення та стандартного відхилення, розрахованих за використання програми MS Excel Analysis Tool Pak. Урожайність пшениці аналізували за дотримання алгоритму ANOVA з рівнем імовірності $P < 0,05$ за допомогою програмного забезпечення Statistica 6.0 (Stat Soft Inc., США).

Результати та їх обговорення. Дослідження, проведені в умовах вегетаційного дослідження, свідчать про позитивний вплив обох бактеріальних штамів на формування надземної маси, коренів і загальної маси рослин пшениці. Водночас отримані результати демонструють переваги застосування *P. polytuxa* KB для передпосівної інокуляції насіння у порівнянні з *B. amyloliquefaciens* B-22 (табл. 1). За внесення до ґрунту біологічно модифікованої азофоски переваги мав варіант із використанням *B. amyloliquefaciens* B-22 для збагачення добрив. Так, приріст загальної маси рослин у цьому варіанті склав 16,2 % проти 8,9 % у варіанті зі збагаченням добрива *P. polytuxa* KB. Це можна пояснити кращою виживаністю *B. amyloliquefaciens* B-22 на гранулах азофоски, оскільки штам у свій час був ізольований з поверхні гранул азофоски й безперечно може бути краще адаптованим до виживання в агресивному середовищі.

Проведені в польових умовах дослідження демонструють покращене фосфорне живлення рослин пшениці за використання збагачених бактеріями добрив у нормі $N_{60}P_{60}K_{60}$, про що опосередковано свідчить зменшення вмісту рухомого P_2O_5 у ризосферному ґрунті (табл. 2). Феномен збіднення концентрації сполук фосфору в ґрунті біля коренів відомий.

Так, за даними [30; 31], у межах 1–3 мм від поверхні кореня концентрація фосфорних сполук може зменшитися в рази, як порівняти з неризосферним або контрольним ґрунтом, оскільки швидкість засвоєння фосфору рослинами, ініційованими дією певних факторів, значно перевершує швидкість горизонтального переміщення в ґрунті фосфорних сполук.

За використання модифікованих добрив у нормі $N_{90}P_{90}K_{90}$ зменшення вмісту рухомого P_2O_5 у ризосферному ґрунті не спостерігали, що, на нашу думку, пояснюється значною кількістю розчинних фосфорних сполук у ґрунті за цих умов.

Отримані значення залежності вмісту рухомого P_2O_5 від застосованих добрив у ризосферному ґрунті значною мірою пояснюються результатами обліку чисельності бактерій, здатних розчиняти мінеральні сполуки фосфору. Так, по невисокому агрофону кількість досліджуваних бактерій у ризосфері рослин суттєво збільшувалася за дії модифікованих добрив, особливо за використання азофоски, збагаченої *B. amyloliquefaciens* B-22. За внесення добрив у нормі $N_{90}P_{90}K_{90}$ підвищення кількості фосфатсолубілізаторів проти контролю спостерігали у перші два терміни відбору зразків (рис.).

Підвищення кількості цих бактерій, на нашу думку, можна пояснити як інтенсивним розвитком *B. amyloliquefaciens* B-22 і *P. polytuxa* KB у ґрунті відповідних варіантів дослідження, так і опосередкованою дією біологічно модифікованої азофоски на формування і активність фотосинтетичного апарату рослин, що може зумовити збільшене надходження

Таблиця 1. Вплив способів застосування бактерій на формування маси рослин пшениці озимої (вегетаційний дослід)

Варіанти дослідження	Суха надземна маса, г/посудину	Маса сухих коренів, г/посудину	Загальна маса рослин, г/посудину
Контроль ($N_{60}P_{60}K_{60}$)	4,19	1,87	6,06
$N_{60}P_{60}K_{60}$ + інокуляція насіння <i>B. amyloliquefaciens</i> B-22	4,49	2,35	6,84
$N_{60}P_{60}K_{60}$ + інокуляція насіння <i>P. polytuxa</i> KB	4,61	2,74	7,35
$N_{60}P_{60}K_{60}$ (добрива, збагачені <i>B. amyloliquefaciens</i> B-22)	4,45	2,59	7,04
$N_{60}P_{60}K_{60}$ (добрива, збагачені <i>P. polytuxa</i> KB)	4,63	1,97	6,60
$НІР_{05}$	0,22	0,31	0,40

Таблиця 3. Урожайність пшениці озимої залежно від особливостей удобрення культури (польовий дослід)

Варіанти дослідів	Урожайність, т/га	Прирости до контролів	
		т/га	%
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀			
Контроль 1 (добрива без збагачення бактеріями)	3,46	–	–
Добриво, модифіковане <i>B. amyloliquefaciens</i> В-22	4,00	0,54	15,6
Добриво, модифіковане <i>P. polytuxa</i> KB	3,61	0,15	4,3
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀			
Контроль 2 (добриво без збагачення бактеріями)	4,30	–	–
Добриво, модифіковане <i>B. amyloliquefaciens</i> В-22	5,79	1,49	34,7
Добриво, модифіковане <i>P. polytuxa</i> KB	5,01	0,71	16,5
НІР ₀₅	0,27		

Таблиця 4. Якісні показники зерна пшениці залежно від особливостей удобрення культури

Варіанти дослідів	Маса 1000 зерен	Натура, г/л	Білок, % у сухій речовині	Масова частка сирової клейковини, %	Число падіння, с
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀					
Добрива без збагачення бактеріями, контроль	41,64 ± 0,29	749 ± 2	8,2 ± 0,3	12,8 ± 0,2	173 ± 3
Добриво, модифіковане <i>B. amyloliquefaciens</i> В-22	41,45 ± 0,70	749 ± 1	9,1 ± 0,3	13,6 ± 0,4	178 ± 1
Добриво, модифіковане <i>P. polytuxa</i> KB	43,19 ± 0,35	752 ± 1	8,7 ± 0,1	12,3 ± 0,5	212 ± 2
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀					
Добрива без збагачення бактеріями, контроль	43,89 ± 0,48	766 ± 3	9,9 ± 0,1	16,3 ± 0,5	225 ± 2
Добриво, модифіковане <i>B. amyloliquefaciens</i> В-22	44,01 ± 0,13	775 ± 2	11,0 ± 0,4	18,4 ± 0,3	290 ± 4
Добриво, модифіковане <i>P. polytuxa</i> KB	44,38 ± 0,38	765 ± 2	9,8 ± 0,2	16,2 ± 0,3	295 ± 4

Так, за вирощування культури по нижчому агрофону застосування обох варіантів біологічного збагачення азофоски забезпечило зростання вмісту білка — з 8,2 % у контролі до 9,1 % за використання *B. amyloliquefaciens* В-22 і до 8,7 % за збагачення добрива *P. polytuxa* KB. І хоча внесення до ґрунту добрива, модифікованого за участі *P. polytuxa* KB, не забезпечило достовірного зростання урожайності, досліджувані характеристики якості зерна здебільшого покращувалися (табл. 4).

Застосування модифікованої азофоски у нормі N₉₀P₉₀K₉₀ потужно впливало на пара-

метри якості продукції за використання добрива, збагаченого *B. amyloliquefaciens* В-22 (табл. 4). Підвищувалася натура зерна, збільшувався вміст білка (з 9,9 % у контролі до 11,0 % у дослідному варіанті), суттєво зростала масова частка сирової клейковини (з 16,3 % до 18,4 %).

Варто зазначити, що у досліді випробували ефективність лише одного виду добрива — азофоски. Водночас для підживлення культури використовували аміачну селітру, яку не збагачували бактеріями. Подальші дослідження потребують визначення можливості поєднання бактерій з іншими видами

мінеральних добрив, зокрема з азотними, і особливостей їх застосування в системах удобрення пшениці озимої. Водночас результати, представлені в цій роботі, свідчать про принципову можливість «доставки» агрономічно корисних бактерій у зону коренів рослин пшениці озимої і корегування продукційного процесу культури за їх участі.

Висновки. Використання для удобрення пшениці озимої азофоски, збагаченої агрономічно цінними бактеріями, сприяло зростанню врожайності культури й покращенню якісних показників продукції.

Мікробіологічна модифікація мінеральних добрив та їх застосування в технологіях вирощування пшениці є перспективним напрямом досліджень.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Beneduzi A., Ambrosini A., Passaglia L. M. P. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Their potential as antagonists and biocontrol agents. *Genet Mol Biol.* 2012. № 35. P. 1044–1051. <https://doi.org/10.1590/S1415-47572012000600020>
2. Ma Y. Biotechnological potential of plant-microbe interactions in environmental decontamination. *Front Plant Sci.* 2019. № 10. 1519. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01519>
3. Volpiano C. G., Lisboa B. B., São José J. F. B., Beneduzi A., Granada C., Vargas L. K. Soil-plant-microbiota interactions to enhance plant growth. *Rev Bras Cienc Solo.* 2022. № 46. e0210098. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210098>
4. Мікробні препарати у землеробстві. Теорія і практика / за ред. В. В. Волкогон. Київ : Аграрна наука, 2006. 312 с.
5. Singh B. K., Trivedi P. Microbiome and the future for food and nutrient security. *Microb Biotechnol.* 2017. № 10. P. 50–53. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12592>
6. Lopes M. J. D. S., Dias-Filho M. B., Gurgel E. S. C. Successful plant growth-promoting microbes: inoculation methods and abiotic factors. *Front Sustain Food Syst.* 2021. № 5. 606454. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.606454>
7. Backer R., Rokem J. S., Pangumarán G., Lamont J., Praslickova D., Ricci E. ... Smith D. L. Plant Growth-Promoting Rhizobacteria: Context, Mechanisms of Action, and Roadmap to Commercialization of Biostimulants for Sustainable Agriculture. *Front. Plant Sci.* 2018. № 9. 1473. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473>
8. Bashan Y. Alginate beads as synthetic inoculant carriers for slow release of bacteria that affect plant growth. *Appl Environ Microbiol.* 1986. № 51(5). P. 1089–1098. <https://doi.org/10.1128/aem.51.5.1089-1098.1986>
9. Głodowska M., Husk B., Schwinghamer T., Smith D. Biochar is a growth-promoting alternative to peat moss for the inoculation of corn with a pseudomonad. *Agron. Sustain. Dev.* 2016. № 36. P. 1–10. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0356-z>
10. He Y., Wu Z., Tu L., Han Y., Zhang G., Li C. Encapsulation and characterization of slow-release microbial fertilizer from the composites of bentonite and alginate. *Appl Clay Sci.* 2015. № 109. P. 68–78. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.02.001>
11. Herrmann L., Lesueur D. Challenges of formulation and quality of biofertilizers for successful inoculation. *Appl Microbiol Biotechnol.* 2013. № 97(20). P. 8859–8873. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5228-8>
12. Курдиш І. К. Інтродукція мікроорганізмів у агроєкосистеми. Київ : Наукова думка, 2010. 254 с.
13. Bashan Y. Alginate beads as synthetic inoculant carriers for slow release of bacteria that affect plant growth. *Appl Environ Microbiol.* 1986. № 51(5). P. 1089–1098. <https://doi.org/10.1128/aem.51.5.1089-1098.1986>
14. Strobel S. A., Allen K., Roberts C., Jimenez D., Scher H. B., Jeoh T. Industrially-scalable microencapsulation of plant beneficial bacteria in dry cross-linked alginate matrix. *Ind Biotechnol.* 2018. № 14(3). P. 138–147. <https://doi.org/10.1089/ind.2017.0032>
15. Vejan P., Abdullah R., Khadiran T., Ismail S. Encapsulation of *Bacillus salmalya* 139SI using double coating biopolymer technique. *Lett Appl Microbiol.* 2019. № 68(1). P. 56–63. <https://doi.org/10.1111/lam.13088>
16. Комбіноване рідке біомінеральне добриво: пат. 110246 Україна. МПК C05C1/00, О. М. Скрипка, Л. М. Токмакова, В. В. Волкогон, заявл. 01.01.2016; опубл. 26.09.2016, Бюл. № 18.
17. Спосіб виготовлення біомінеральних добрив з властивостями активізації процесу засвоєння рослинами сполук біогенних елементів з добрив: пат. 110252 Україна. МПК C05F 11/08 (2006.01), C12N 1/20, О. М. Скрипка, Л. М. Токмакова, В. В. Волкогон, заявл. 01.01.2016; опубл. 26.09.2016, Бюл. № 18.
18. Method of preparing a fertilizer and a plant growth promoting bacteria composition for adding to a base fertilizer: pat. PCT/IB2016/001875, WO2017/051258 A2, F. Couture, M. Arshad; applicant: Doverfield exports-UAE; priority data 07.07.2015; publ. 05.07.2016.
19. Ahmad S., Imran M., Hussain S., Mahmood S., Hussain A., Hasnain M. Bacterial impregnation of mineral fertilizers improves yield and nutrient use efficiency of wheat. *J Sci Food Agric.* 2017.

№ 11. P. 3695–3690. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8228>

20. Sas-Paszt L., Smolińska U., Kowalska B., Szczech M., Lisek A., Trzciński P. ... Sumorok B. Influence of microbiologically enriched mineral fertilizers on selected groups of microorganisms in the rhizosphere of strawberry plants. *J. Horticultural Research*. 2021. № 29(1). P. 35–46. <https://doi.org/10.2478/johr-2021-0005>

21. Sasina T., Volkogon V., Moskalenko A., Shevchenko L., Dimova S., Volkogon K. Microorganisms on granular fertilizers and prospects of their application as PGPM. *Journal of Central European Agriculture*. 2025. № 26(3). P. 667–679. <https://doi.org/10.5513/JCEA01/26.3.4589>

22. Шевченко Л. А., Сасіна Т. С., Глушаков І. М., Бондар І. М., Селінний М. М., Дімова С. Б. ... Волкогон В. В. Ефективність *Vacillus sp.* 22 при вирощуванні пшениці озимої. Мікробіологія в сучасному сільськогосподарському виробництві: матеріали XVII Всеукраїнської науково-практичної онлайн-конференції молодих вчених (Чернігів, 25 жовтня). Чернігів, 2024. С. 87–89.

23. Експериментальна ґрунтова мікробіологія / за ред. В. В. Волкогона. Київ : Аграрна наука, 2010. 464 с.

24. ДСТУ 3768:2019. Пшениця. Технічні умови. [Чинний від 2019-05-14]. Вид. офіц. Київ, 2019, 15 с.

25. ДСТУ ISO 7971-2:2005. Зернові культури. Визначення об'ємної маси, маси тисячі зерен та щільності. Частина 2. Методика визначення об'ємної маси. [Чинний від 2006-01-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2006. 10 с. (ISO 7971-2:1995, IDT).

26. ДСТУ 4711:2007. Зерно і продукти його переробки. Визначення показників якості методом інфрачервоної спектроскопії. [Чинний від 2008-01-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2008. 14 с.

27. ДСТУ 13586.5-93. Зерно. Метод визначення склоподібності. [Чинний від 1994-01-01]. Київ : Держстандарт України, 1994. 6 с.

28. ДСТУ ISO 3093:2007. Пшениця, пшеничне борошно та пшенична крупа. Визначення числа падіння методом Хагберга-Пертена. [Чинний від 2008-01-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2008. 12 с. (ISO 3093:2004, IDT).

29. ДСТУ 4115-2002. Пшениця. Метод визначення вмісту та якості клейковини. [Чинний від 2003-01-01]. Київ : Держстандарт України, 2003. 10 с.

30. Tinker P. B., Nye P. Solute movement in the rhizosphere. Oxford, UK : Oxford University Press, New York, 2000. 464 p.

31. Jones D. L., Hodge A., Kuzyakov Y. Plant and mycorrhizal regulation of rhizodeposition. *New Phytologist*. 2004. № 163. P. 459–480. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01130.x>

Отримано: 20.08.2025

Прийнято до друку: 08.10.2025

Опубліковано онлайн: 29.12.2025

EFFECTIVENESS OF BIOLOGICALLY MODIFIED AZOFOSKA IN WINTER WHEAT GROWING

V. V. Hlushakov, <https://orcid.org/0009-0002-5472-3303>,

V. V. Volkohon, <https://orcid.org/0000-0003-0675-1318>,

T. S. Sasina, <https://orcid.org/0000-0003-4021-9202>,

S. B. Dimova, <https://orcid.org/0000-0003-2440-6657>,

K. I. Volkohon, <https://orcid.org/0000-0002-7156-4124>,

L. A. Shevchenko, <https://orcid.org/0000-0002-2637-1999>

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

Objective. To research the effectiveness of azofoska mineral fertilizer enriched with agronomically valuable bacteria in growing winter wheat on leached black soil. **Methods.** Microbiological (cultivation of bacterial cultures, enrichment of mineral fertilizer, counting the number of bacteria in the inoculum, on fertilizer granules and in the rhizosphere soil of plants); vegetation and field experiments; analytical (determination of the content of mobile P_2O_5 in the rhizosphere soil of wheat plants, protein content in grain, mass fraction of gluten, mass of 1000 grains), statistical. **Results.** The mineral fertilizer azofoska was modified with the participation of agronomically valuable bacteria capable of optimizing the production process of winter wheat during pre-sowing seed inoculation. The use of fertilizer enriched with *Paenibacillus polymyxa* KB at the rate of $N_{60}P_{60}K_{60}$ did not provide a significant increase in the wheat yield, but contributed to improving the quality indicators of the product (the weight of 1000 grains and the protein content in the product increased). The application of the same type of experimental fertilizer at the rate of $N_{90}P_{90}K_{90}$ to the soil contributed to a 16.5 % increase in productivity. The use of fertilizer modified with *Bacillus amyloliquefaciens* B-22 increased the wheat yield when growing crops in both conditions: by 15.6 % when applying fertilizer at the rate of $N_{60}P_{60}K_{60}$ and by 34.7 % at the rate of $N_{90}P_{90}K_{90}$. There was a significant increase in the weight of 1000 grains, protein content, and gluten mass fraction in the grain. **Conclusions.** The use of microbiologically modified azofoska for winter wheat fertilizing contributes to the increase in crop yield and improvement in product quality. *B. amyloliquefaciens* B-22 has a more intense effect on wheat productivity than *P. polymyxa* KB. Research into the biological modification of mineral fertilizers and determining their effectiveness in crop fertilization technologies is promising.

Key words: microbiological modification of mineral fertilizers, agronomically valuable bacteria, *Paenibacillus polymyxa*, *Bacillus amyloliquefaciens*.

REFERENCES

1. Beneduzi, A., Ambrosini, A., & Passaglia, L. M. P. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Their potential as antagonists and biocontrol agents. *Genet Mol Biol*, 35, 1044–1051. <https://doi.org/10.1590/S1415-47572012000600020>
2. Ma, Y. (2019). Biotechnological potential of plant-microbe interactions in environmental decontamination. *Front Plant Sci*, 10, 1519. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01519>
3. Volpiano, C. G., Lisboa, B. B., São José, J. F. B. Beneduzi, A., Granada, C., & Var-

gas, L. K. (2022). Soil-plant-microbiota interactions to enhance plant growth. *Rev Bras Cienc Solo*, 46, e0210098. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210098>

4. Volkogon, V. V. (Ed.). (2006). *Mikrobní preparaty u zemlerobstvi. Teoriya i praktyka* [Microbial preparations in agriculture. Theory and practice]. Kyiv: Ahrarna Nauka [in Ukrainian].

5. Singh, B. K., Trivedi, P. (2017). Microbiome and the future for food and nutrient security. *Microb Biotechnol*, 10, 50–53. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12592>

6. Lopes, M. J. D. S., Dias-Filho, M. B., & Gurgel, E. S. C. (2021). Successful plant growth-promoting microbes: inoculation methods and abiotic factors. *Front Sustain Food Syst*, *5*, 606454. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.606454>
7. Backer, R., Rokem, J. S., Ilangumaran, G., Lamont, J., Praslickova, D., Ricci, E. ... Smith, D. L. (2018). Plant Growth-Promoting Rhizobacteria: Context, Mechanisms of Action, and Roadmap to Commercialization of Biostimulants for Sustainable Agriculture. *Front Plant Sci*, *9*, 1473. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473>
8. Bashan, Y. (1986). Alginate beads as synthetic inoculant carriers for slow release of bacteria that affect plant growth. *Appl Environ Microbiol*, *51*(5), 1089–1098. <https://doi.org/10.1128/aem.51.5.1089-1098.1986>
9. Głodowska, M., Husk, B., Schwinghamer, T., & Smith, D. (2016). Biochar is a growth-promoting alternative to peat moss for the inoculation of corn with a pseudomonad. *Agron Sustain Dev*, *36*, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0356-z>
10. He, Y., Wu, Z., Tu, L., Han, Y., Zhang, G., & Li, C. (2015). Encapsulation and characterization of slow-release microbial fertilizer from the composites of bentonite and alginate. *Appl Clay Sci*, *109*, 68–78. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.02.001>
11. Herrmann, L., Lesueur, D. (2013). Challenges of formulation and quality of biofertilizers for successful inoculation. *Appl Microbiol Biotechnol*, *97*(20), 8859–8873. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5228-8>
12. Kurdysh, I. K. (2001). *Introduktsiya mikro-orhanizmv u ahroekosystemy* [Introduction of microorganisms into agroecosystems]. Kyiv: Naukova Dumka [in Ukrainian].
13. Bashan, Y. (1986). Alginate beads as synthetic inoculant carriers for slow release of bacteria that affect plant growth. *Appl Environ Microbiol*, *51*(5), 1089–1098. <https://doi.org/10.1128/aem.51.5.1089-1098.1986>
14. Strobel, S. A., Allen, K., Roberts, C., Jimenez, D., Scher, H. B., & Jeoh, T. (2018). Industrially-scalable microencapsulation of plant beneficial bacteria in dry cross-linked alginate matrix. *Ind Biotechnol*, *14*(3), 138–147. <https://doi.org/10.1089/ind.2017.0032>
15. Vejan, P., Abdullah, R., Khadiran, T., & Ismail, S. (2019). Encapsulation of *Bacillus salmalaya* 139SI using double coating biopolymer technique. *Lett Appl Microbiol*, *68*(1), 56–63. <https://doi.org/10.1111/lam.13088>
16. Pat. 110246 UA, MPK C05C1/00. Kombinovane ridke biomineralne dobrovo [Combined liquid biomineral fertilizer], Skrypka, O. M., Tokmakova, L. M., Volkogon, V. V., Publ. 26.09.2016 [in Ukrainian].
17. Pat. 110252 UA, MPK C05F 11/08 (2006.01), C12N 1/20. Sposib vyhotovlennia biomineralnykh dobrov z vlastyvostiamy aktyvizatsii protsesu zasvoiennia roslynamy spoluk biohennykh elementiv z dobrov [The method of manufacturing biomineral fertilizers with the properties of activating the process of assimilation of compounds of biogenic elements from fertilizers by plants], Skrypka, O. M., Tokmakova, L. M., Volkogon, V. V., Publ. 26.09.2016 [in Ukrainian].
18. Pat. PCT/IB2016/001875, WO2017/051258 A2. Method of preparing a fertilizer and a plant growth promoting bacteria composition for adding to a base fertilizer. applicant: Doverfield exports-UAE. Couture, F., Arshad, M., Publ. 05.07.2016.
19. Ahmad, S., Imran, M., Hussain, S., Mahmood, S., Hussain, A., & Hasnain, M. (2017). Bacterial impregnation of mineral fertilizers improves yield and nutrient use efficiency of wheat. *J Sci Food Agric*, *11*, 3695–3690. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8228>
20. Sas-Paszt, L., Smolińska, U., Kowalska, B., Szczech, M., Lisek, A., Trzciński, P. ... Sumorok, B. (2021). Influence of microbiologically enriched mineral fertilizers on selected groups of microorganisms in the rhizosphere of strawberry plants. *J Horticultural Research*, *29*(1), 35–46. <https://doi.org/10.2478/johr-2021-0005>
21. Sasina, T., Volkogon, V., Moskalenko, A., Shevchenko, L., Dimova, S., & Volkogon, K. (2025). Microorganisms on granular fertilizers and prospects of their application as PGPM. *J Central European Agriculture*, *26*(3), 667–679. <https://doi.org/10.5513/JCEA01/26.3.4589>
22. Shevchenko, L. A., Sasina, T. S., Glushakov, V. V., Bondar, I. M., Selinnyi, M. M., Dimova, S. B. ... Volkogon, V. V. (2024). Efektyvnist *Bacillus* sp. 22 pry vyroshchuvanni pshenytsi ozymoi [The effectiveness of *Bacillus* sp. 22 in growing winter wheat]. Proceedings of the Scientific Conference of young scientists Microbiology in modern agricultural production (pp. 87–89), Chernihiv [in Ukrainian].
23. Volkogon, V. V. (Ed.). *Eksperymental'na gruntova mikrobiolohiya*. [Experimental soil microbiology]. Kyiv: Ahrarna Nauka [in Ukrainian].
24. DSTU 3768:2019. Pshenytsya. Tekhnichni umovy. [Wheat. Technical conditions], Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy [in Ukrainian].
25. DSTU ISO 7971-2:2005. Zernovi kul'tury. Vyznachennya ob'yemnoyi masy, masy tysyachi zeren ta shchil'nosti. Chastyna 2. Metodyka vyznachennya ob'yemnoyi masy. [Cereal crops. Determination of bulk density, thousand-grain mass and density. Part 2. Method for determining bulk density]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy [in Ukrainian]. (ISO 7971-2:1995, IDT).

26. DSTU 4711:2007. Zerno i produkty yoho pererobky. Vyznachennya pokaznykiv yakosti metodom infrachervonoyi spektrometriyi. [Grain and its processing products. Determination of quality indicators by infrared spectrometry]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy [in Ukrainian].
27. DSTU 13586.5-93. Zerno. Metod vyznachennya sklopodibnosti. [Grain. Method for determining vitreousness]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy [in Ukrainian].
28. DSTU ISO 3093:2007. Pshenytsya, pshe-nychne boroshno ta pshenychna krupa. Vyznachen-nya chysla padinnya metodom Khahberha-Pertena. [Wheat, wheat flour and wheat groats. Determina- tion of falling number by the Hagberg-Perten method]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy [in Uk- rainian]. (ISO 3093:2004, IDT).
29. DSTU 4115-2002. Pshenytsya. Metod vyz- nachannya vmistu ta yakosti kleykovyny. [Wheat. Method for determining gluten content and quality]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy [in Ukrainian].
30. Tinker, P. B., Nye, P. (2000). Solute move- ment in the rhizosphere. Oxford, UK: Oxford Uni- versity Press, New York.
31. Jones, D. L., Hodge, A., Kuzyakov, Y. (2004). Plant and mycorrhizal regulation of rhizodeposition. *New Phytologist*, 163, 459–480. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01130.x>

Received: 20.08.2025

Accepted: 08.10.2025

Published online: 29.12.2025