

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗБАГАЧЕНИХ МІКРООРГАНІЗМАМИ ДОБРІВ ЗА ВИРОЩУВАННЯ КАРТОПЛІ

В. В. Волкогон, С. Б. Дімова, Т. С. Сасіна, К. І. Волкогон,
Л. А. Шевченко, Н. П. Штанько, І. А. Земська

Інститут сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН
вул. Шевченка, 97; м. Чернігів, 14030, Україна; e-mail: volkogon@ukr.net

Мета. Дослідити можливість збагачення мінеральних добрив (азофоска: NPK 16:16:16) агрономічно корисними мікроорганізмами за нанесення їх суспензій на гранули туків. **Методи.** Мікробіологічні (культивування мікроорганізмів на різних середовищах, отримання суспензій, визначення титру в суспензіях, мікроскопіювання), польового дрібноділянкового досліду у шести повтореннях (вирощування картоплі на дерново-підзолистому ґрунті), повного обліку врожаю з кожної ділянки, статистичні. **Результати.** Збагачення азофоски мікроорганізмами за нанесення водних суспензій *Trichoderma harzianum* PD3 і представників роду *Bacillus* на гранули добрив перед їх внесенням до дерново-підзолистого ґрунту в нормі N₈₀P₈₀K₈₀ по-різному впливало на урожайність картоплі сорту Беллароза. Добрива, збагачені *T. harzianum* PD3 і *Bacillus* sp. 102, сприяли достовірному зростанню урожайності культури в трирічному експерименті. Поєднання цих мікроорганізмів для збагачення азофоски не забезпечило стабільного ефекту за роками досліджень. Використання добрив, збагачених *B. vallismortis* 44, а також *B. cereus* СБ1 не було ефективним. Найбільший приріст врожаю картоплі забезпечило використання добрив, збагачених *Bacillus* sp. 102. Водночас спостерігали незначні відхилення від середнього показника в усіх шести повтореннях у дослідях (на відміну від інших варіантів). **Висновки.** Показано принципову можливість підвищення ефективності мінеральних добрив за їх збагачення агрономічно корисними мікроорганізмами за вирощування картоплі на дерново-підзолистому ґрунті. Ефективність біологічно модифікованої азофоски залежала від використаного для збагачення мікроорганізму. Потрібно провести додаткові дослідження як зі скринінгу перспективних для збагачення мінеральних добрив штамів мікроорганізмів, так і технологічних аспектів (чисельність клітин мікроорганізмів на гранулах добрив, використання прилипачів, джерел Карбону та ад'ювантів для збагачення добрив, терміни збереження мікроорганізмів на гранулах залежно від умов збагачення, розширення спектру різновидів добрив та видів сільськогосподарських культур тощо).

Ключові слова: мікроорганізми на гранулах добрив, бактерії роду *Bacillus*, *Trichoderma harzianum*.

Вступ. Використання мікробіологічних засобів інтенсифікації сільськогосподарського виробництва відоме ще з початку минулого століття, коли було розпочато масштабне застосування передпосівної інокуляції насіння бобових культур активними штамми бульбочкових бактерій [8; 17; 25]. Утім, відсутність гарантованого ефекту від застосування цього агроприйому, недосконалість

знань про особливості взаємодії бактерій з рослиною й загальна недовіра аграріїв до можливості вплинути на продукційний процес сільськогосподарських культур шляхом застосування невеликої кількості інокулянту не сприяли широкому впровадженню цих нововведень у сільськогосподарське виробництво. Пізніше було показано принципову можливість позитивного впливу інокуляції

небобових культур за застосування експериментальних біодобрив на основі бактерій, здатних до азотфіксації (*Azotobacter chroococcum*) та фосфатмобілізації (*Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*). Базуючись на цих знаннях, у 60-х роках ХХ ст. в СРСР розпочали масове виробництво мікробних препаратів на основі зазначених бактерій (виробництво розміщувалося на трьох заводах) [7]. Проте і в цьому разі значних успіхів для сільського господарства не було досягнуто, і через деякий час виробництво препаратів було призупинено. Справжній сплеск зацікавленості до мікробних препаратів з'явився наприкінці минулого століття. Цьому передувала низка незалежних одна від одної причин. По-перше, значно погіршився екологічний стан ґрунтів зокрема і довкілля взагалі через інтенсивне, часто неконтрольоване застосування мінеральних добрив та пестицидів у технологіях вирощування сільськогосподарських культур. Унаслідок цього виникла значна стурбованість суспільства й регуляторних органів багатьох країн щодо подальших перспектив інтенсифікації сільськогосподарського виробництва. По-друге, унаслідок активного розвитку таких напрямів ґрунтової мікробіології, як асоціативна азотфіксація [26; 27] і взаємодія мікроорганізмів з рослинами [3; 21; 31; 32; 39; 41] було досягнуто значних успіхів у розумінні ролі мікроорганізмів в органогенезі рослин. Інтенсифікація досліджень за цими напрямками сприяла розробці мікробних препаратів для сільськогосподарських культур і навіть їх комерціалізації [1; 5; 6; 19; 24; 36]. Показано перспективність застосування як інокулянтів представників родів *Azospirillum* [18; 35], *Bacillus* [23], *Pseudomonas* [37], *Actinobacteria* [2; 38], *Lactobacillus* [34]. Крім того, встановлено можливість позитивного впливу на формування урожайності культур бактерій з родів *Acetobacter*, *Paenibacillus*, *Burkholderia*, *Herbaspirillum*, *Rhodococcus* [14].

Водночас треба констатувати, що успіхи інокуляції значною мірою залежать від форми препарату та особливостей застосування [15].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Індустрія інокулянтів як бобових, так і небобових культур зосереджується здебільшого на отриманні суспензій бактеріальних культур (зі стабілізуювальними чи стимулю-

вальними добавками або без них) та на їх поєднанні з твердими носіями, найпоширенішим серед яких є торф [1; 20]. Нещодавно було показано, що альтернативою торфу може бути біовугілля (Biochar), оскільки його пористість і вміст поживних речовин можна змінювати відповідно до вихідного матеріалу та умов виробництва [28]. Зазначені форми біопрепаратів використовують переважно для передпосівної інокуляції насіння за використання прилипаців. Рідкі інокулянти можна також вносити безпосередньо в посівну борозну за використання пристосованих для цього механізмів. Крім зазначених форм біопрепаратів, використовується також мікрокапсуляція та іммобілізація бактеріальних клітин на полімерних матрицях, таких як альгінат, агар, пектин, хітозан, поліакриламід. Після інкапсуляції клітини є захищеними матрицею від механічних пошкоджень і стресу [29; 30]. Повільна та безперервна деградація матеріалу матриці вивільняє мікроорганізми, дозволяючи інокулянту залишатися в ґрунті протягом тривалого часу [16; 33; 40; 42]. За цих умов бактерії також захищені від згубного впливу агрохімікатів на насінні та в ґрунті. На жаль, ці технології є доволі обмеженими через складнощі в їх реалізації.

У технологіях вирощування сільськогосподарських культур застосовується також і позакоренева обробка за використання біоінокулянтів [9; 10; 22], що можна розглядати як певного роду доповнення до класичного методу інокуляції насіння. Позакореневий обробіток може бути надзвичайно дієвим за використання мікробних препаратів з високим вмістом фітогормонів та інших фізіологічно активних речовин. Теоретично ефективність цього може переважати вплив застосування окремих фітогормонів чи їхніх синтетичних аналогів, оскільки на рослину діятиме комплекс активних чинників.

Останнім часом з'явилися повідомлення про ефективність використання мінеральних добрив, збагачених агрономічно цінними мікроорганізмами [4; 11–13; 43]. Безперечно, подібні рішення є досить привабливими, зважаючи на простоту застосування, проте невелика кількість публікацій за цим вектором досліджень викликає багато запитань, серед яких, насамперед, — наскільки відтворюваними є ці результати?

У зв'язку з вищезазначеним, метою на-

ших досліджень є з'ясування принципів можливостей успішності застосування мінеральних добрив, збагачених мікроорганізмами.

Матеріали і методи. Мікробіологічні аспекти дослідження. У дослідженнях використовували кілька видів мікроорганізмів: *Trichoderma harzianum* PD3, *Bacillus* sp. 102, *Bacillus vallismortis* 44, *B. cereus* СБ1. Як штам мікроміцета, так і бактеріальні штами характеризуються низкою важливих з агрономічного боку якостей: продукують фітогормони, проявляють антагоністичні властивості проти збудників окремих захворювань сільськогосподарських культур, здатні розчиняти малорозчинні мінеральні фосфати. Зазначені мікроорганізми раніше селекціоновані авторами й зберігаються в Колекції корисних ґрунтових мікроорганізмів Інституту сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН (ІСМАВ), яка має статус національного надбання.

T. harzianum PD3 для досліджень вирощували на сусло-агарі протягом 120 годин за температури 28 °С, після чого біомасу змивали стерильною водою. Визначали кількість колонієутворювальних одиниць (КУО) у суспензії за висіву її розведень на сусло-агар. У споро-міцеліальній суспензії відзначали значну кількість спор.

Для отримання інокулюму *Bacillus* sp. 102 бактерію вирощували на МПА протягом 72 годин за температури 28 °С, після чого біомасу змивали стерильною водою. Титр бактеріальної суспензії визначали шляхом мікроскопії за використання камери Горяєва та за висіву розведень суспензії на МПА. На час мікроскопіювання близько 98 % клітин перебували у вигляді спор.

Інокулюм *B. vallismortis* 44 та *B. cereus* СБ1 також отримували за вирощування бактерій на МПА протягом 72 годин за температури 28 °С. Біомасу змивали стерильною водою. Бактеріальні титри визначали так само, як і для *Bacillus* sp. 102. На час мікроскопіювання близько 68 % клітин *B. vallismortis* 44 і 55 % *B. cereus* СБ1 перебували у вигляді спор.

Отримані суспензії наносили на гранули азофоски (азофоска: NPK 16:16:16). Попередньо до суспензій як прилипач додавали розчин сахарози так, щоб кінцева концентрація

сахарози дорівнювала 1 %. Застосовані об'єми суспензій мікроорганізмів з сахарозою складала 2 % від маси добрива (такий об'єм був необхідний для рівномірного нанесення мікроорганізмів на гранули мінерального добрива). Кількість КУО мікроорганізмів на гранулах добрив складала: для *T. harzianum* PD3 — $6,5 \cdot 10^7$ КУО/г у 2020 р., $6,0 \cdot 10^7$ КУО/г у 2021 р. і $7,2 \cdot 10^7$ КУО/г у 2022 р.; для *Bacillus* sp. 102 — $4 \cdot 10^9$ КУО/г у 2020 р., $3,2 \cdot 10^9$ КУО/г у 2021 р. і $3,8 \cdot 10^9$ КУО/г у 2022 р.; для *B. vallismortis* 44 — $4,5 \cdot 10^9$ КУО/г; для *B. cereus* СБ1 — $3,8 \cdot 10^9$ КУО/г у 2021 р. Для одного з варіантів досліду гранули добрив обробляли суспензіями мікроміцета і *Bacillus* sp. 102. Відповідно, кількість КУО мікроорганізмів у цьому випадку була сумарною. Добрива для контрольного варіанту для чистоти експерименту обробляли розчином сахарози. Отримані у такий спосіб збагачені мікроорганізмами та сахарозою добрива підсушували протягом 24 годин за кімнатної температури і вносили в ґрунт відповідно до схем польового досліду.

Дизайн польових дослідів. Дослідження ефективності збагачених мікроорганізмами мінеральних добрив проводили протягом 2020–2022 рр. за умов польових дрібноділянкових дослідів на дерново-підзолистому окультуреному пилувато-супіщаному ґрунті (рН_{сол.} 5,8; вміст гумусу — 1,1 %; азоту, що легко гідролізується, — 45 мг/кг; P₂O₅ — 170 мг/кг; K₂O — 62 мг/кг ґрунту) дослідного поля ІСМАВ за вирощування картоплі сорту Беллароза. Повторність у дослідях — шестикратна. Площа однієї ділянки — 14,7 м² (2,1 м × 7 м). Розміщення ділянок у дослідях — рендомізоване. Як попередник у дослідях вирощували овес.

Мінеральні добрива (азофоска) застосовували у нормі N₈₀P₈₀K₈₀. Відповідно, кількість добрив (у фізичній масі) становила 735 г/ділянку.

Схема досліду № 1 (2020 р.):

1. Без збагачення мікроорганізмами, контроль.
2. Добриво, збагачене *Trichoderma harzianum* PD3.
3. Добриво, збагачене *Bacillus* sp. 102.
4. Добриво, збагачене *B. vallismortis* 44.
5. Добриво, збагачене *B. cereus* СБ1.

Схема досліду № 2 (2021 р. та 2022 р.):

1. Без збагачення мікроорганізмами,

контроль.

2. Добриво, збагачене *T. harzianum* PD3).

3. Добриво, збагачене *Bacillus* sp. 102).

4. Добриво, збагачене *T. harzianum* PD3 + *Bacillus* sp. 102.

Проводили облік урожаю картоплі поділяючою прямим зважуванням. Отримані значення перераховували в показники урожайності, т/га.

Погодні умови в роки проведення досліджень. У 2020 р. температурні показники були загалом сприятливими для вегетації рослин картоплі й формування урожайності культури. Гідротермічний коефіцієнт (ГТК) дорівнював 1,0–1,3 протягом вегетаційного періоду, що свідчить про сприятливі умови вологозабезпечення.

2021 р. загалом був багатим на опади у травні й червні, проте липень і серпень були посушливими. Червень і липень також характеризувалися підвищеними температурами.

У 2022 р. кліматичні умови були цілком задовільними для вегетування картоплі — достатня забезпеченість вологою й порівняно незначні відхилення температурних показників від середніх багаторічних.

Статистичний аналіз. Відмінності між варіантами залежно від досліджуваних факторів аналізували за методами варіаційної статистики. У таблицях наведено середні значення, що є достовірними за $p \leq 0,05$.

Результати та їх обговорення. У виборі мікроорганізмів для випробування їхньої ефективності за збагачення мінеральних добрив серед значної кількості наявних у колекції штамів агрономічно корисних мікроорганізмів, яка охоплює представників різних таксонів, ми керувалися такими критеріями, як їхня потенційна цінність, а також здатність до формування спор. На нашу думку, виживання мікроорганізмів у доволі агресив-

ному хімічному середовищі (поверхня синтетичного мінерального добрива) до моменту їх переходу з гранул добрив у ґрунтовий розчин буде вищим за наявності спор у суспензіях. У зв'язку з вищезазначеним для досліджень було відібрано *T. harzianum* PD3 і три штами бацил.

Проведені у 2020 р. дослідження показали приріст урожайності картоплі у варіанті зі збагаченням амофоски *Bacillus* sp. 102 (табл. 1). Варто відзначити незначні стандартні відхилення від середнього показника (у межах $\pm 0,57$ т/га), тобто вплив бактеріального збагачення забезпечував стабільний ефект. Середнє значення урожайності у варіанті застосування добрива, збагаченого *T. harzianum* PD3, також було вищим за показник контролю, проте відмінності в продуктивності культури за повтореннями дослідів нівелювали статистичну значимість приросту (відхилення сягали $\pm 4,10$ т/га).

Використання *B. vallismortis* 44 і *B. cereus* СБ1 для обробки гранул азофоски не забезпечило позитивного ефекту — показники урожайності мали навіть тенденцію до зниження, як порівняти з контролем (табл. 1).

Під час проведення дослідів у 2021 р. і 2022 р. ми змінили схему і включили до випробування лише добрива, збагачені *T. harzianum* PD3 і *Bacillus* sp. 102, а також варіант з поєднанням цих мікроорганізмів (табл. 2).

Урожайність картоплі в досліді у 2021 р. загалом була невисокою через складні метеорологічні особливості вегетаційного періоду (зокрема, високі температури в період формування стелонів). Проте отримані результати підтвердили позитивний вплив збагачених добрив (табл. 2). Так, урожайність картоплі за застосування азофоски, збагаченої *T. harzianum* PD3, в середньому у 2021 р. зросла на 3,68 т/га (20,0 %). Такий самий

Таблиця 1. Урожайність картоплі за впливу збагачених мікроорганізмами добрив, 2020 р.

Варіанти дослідів	Урожайність, т/га	Приріст до контролю	
		т/га	%
Без збагачення мікроорганізмами, контроль	23,14 \pm 1,61	—	—
Добриво, збагачене <i>T. harzianum</i> PD3	26,26 \pm 4,10	—	—
Добриво, збагачене <i>Bacillus</i> sp. 102	28,80 \pm 0,57	5,66	24,5
Добриво, збагачене <i>B. vallismortis</i> 44	23,09 \pm 2,72	—	—
Добриво, збагачене <i>B. cereus</i> СБ1	22,83 \pm 3,72	—	—

Таблиця 2. Вплив збагачених добрив на урожайність картоплі сорту Беллароза, т/га

Варіанти дослідів	2021 р.			2022 р.		
	урожайність, т/га	приріст до контролю		урожайність, т/га	приріст до контролю	
		т/га	%		т/га	%
Без збагачення мікроорганізмами, контроль	18,36 ± 0,95	–	–	28,60 ± 1,72	–	–
Добриво, збагачене <i>T. harzianum</i> PD3	22,04 ± 2,55	3,68	20,0	33,72 ± 3,80	5,12	17,9
Добриво, збагачене <i>Bacillus</i> sp. 102	22,04 ± 1,12	3,68	20,0	35,65 ± 1,52	7,05	24,7
Добриво, збагачене <i>T. harzianum</i> PD3 + <i>Bacillus</i> sp. 102	22,84 ± 2,74	4,48	24,4	27,48 ± 1,91	–	–

рівень урожайності відзначено у варіанті з *Bacillus* sp. 102. За використання для удобрення картоплі азофоски з *T. harzianum* PD3 та *Bacillus* sp. 102 урожайність культури у цей рік була найвищою в досліді — приріст склав 4,48 т/га (24,4 %). Як і у 2020 р., відзначено незначні стандартні відхилення показників урожайності (за повтореннями дослідів) у варіанті з використанням азофоски, збагаченої *Bacillus* sp. 102.

У 2022 р. найбільший приріст урожайності картоплі відзначено у варіанті з використанням добрив, збагачених *Bacillus* sp. 102, — 7,05 т/га (24,7 %). Дещо меншою була урожайність у варіанті з внесенням азофоски, збагаченої *T. harzianum* PD3, — приріст до контролю склав 5,12 т/га (17,9 %). За використання добрива, збагаченого обома мікроорганізмами, у цьому році не відзначено підвищення урожайності культури (табл. 2).

Пояснити суперечливі результати, отримані за поєднання досліджуваних мікроміцета і бактерії для збагачення добрива, доволі складно. Можливо, на це вплинули погодні умови. Так, у 2021 р. протягом вегетаційного періоду картоплі спостерігали тимчасові посушливі явища з високими температурами повітря й ґрунту, натомість у 2022 р. забезпечення ґрунту вологою було практично ідеальним для формування урожайності культури.

Варто зауважити, що у варіанті з використанням збагаченої *Bacillus* sp. 102 азофоски відзначаються доволі близькі показники урожайності картоплі в усіх повторен-

нях (так само, як і у 2020 р.), чого не можна сказати про інші варіанти.

Отже, нами підтверджено принципову можливість застосування збагачених агрономічно цінними мікроорганізмами мінеральних добрив, як це показано в інших роботах [4; 13; 43]. Безперечно, отримані результати є первинними, вони можуть не підтвердитися за збагачення інших різновидів мінеральних добрив, а також за їх застосування під інші види сільськогосподарських культур. Розвиток цих досліджень у подальшому потребуватиме розширення кількості штамів мікроорганізмів для збагачення добрив, визначення ступеня збереженості клітин на гранулах, можливо, застосування прилипачів та захисних речовин, з'ясування поведінки мікроорганізмів у ґрунті після внесення добрив, характеру їхньої взаємодії з рослинами, впливу рівнів вмісту вологи в ґрунтах та ін. Ми також розглядаємо варіант додаткового нанесення на гранули, крім мікроорганізмів, джерел Карбону для можливого забезпечення умов формування популяції мікроорганізмів безпосередньо біля гранул добрив.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Мікробні препарати у землеробстві. Теорія і практика / за ред. В. В. Волкогона. К. : Аграрна наука, 2006. 312 с.
2. Белявская Л. А., Козырицкая В. Е., Валагурова Е. В., Иутинская Г. А. Биологически активные вещества препарата аверком. *Мікробіологічний журнал*. 2012. Т. 74. № 3. С. 10–15.

3. Гельцер Ф. Ю. Симбиоз с микроорганизмами — основа жизни растений. М : Изд. МСХА, 1990. 134 с.
4. Джуманиязова Г., Нарбаева Х., Махмудова К., Закирьяева С., Бабина А. Влияние модифицированных с помощью бактериального удобрения fosstim-3 биоминеральных удобрений на рост и развитие проростков красного горького перца. *Web of Scholar*. 2018. Т. 6. № 24. С. 10–12. http://doi.org/10.31435/rsglobal_wos/12062018/5731
5. Биорегуляция микробно-растительных систем / под ред. Г. А. Иутинской и С. П. Пономаренко. К. : Ничлава, 2010. 467 с.
6. Курдиш І. К. Інтродукція мікроорганізмів у агроєкосистеми. К. : Наукова думка, 2010. 198 с.
7. Мишустин Е. Н. Микроорганизмы и продуктивность земледелия. М. : Наука, 1972. 343 с.
8. Біологічний азот / за ред. В. П. Патики. К. : Світ, 2003. 424 с.
9. Токмакова Л. М., Шевченко Л. А. Вплив Поліміксобактерину на продуктивність кукурудзи за різного способу застосування. *Агроєкологічний журнал*. 2019. № 1. С. 80–84.
10. Шевченко Л. А. Розвиток кореневої системи рослин кукурудзи за впливу Поліміксобактерину — стимулятора росту рослин. *Сільськогосподарська мікробіологія*. 2017. Вип. 26. С. 42–48. <https://doi.org/10.35868/1997-3004.26.42-48>
11. Комбіноване рідке біомінеральне добриво: пат. 110246 Україна. МПК (2016.01), C05C 1/00, О. М. Скрипка, Л. М. Токмакова, В. В. Волкогон; заявл. 01.01.2016; опубл. 26.09.2016, Бюл. № 18.
12. 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 (2006.01), О. М. Скрипка, Л. М. Токмакова, В. В. Волкогон; заявл. 01.01.2016; опубл. 26.09.2016, Бюл. № 18.
13. 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>
14. Babalola O. O. Beneficial bacteria of agricultural importance. *Biotechnol. Lett*. 2010. № 32. P. 1559–1570. <https://doi.org/10.1007/s10529-010-0347-0>
15. Backer R., Rokem J. S., Ilangumaran G., Lamont J., Praslickova D., Ricci E., Subramanian S., 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>
16. Bashan Y. Alginate beads as synthetic inoculant carriers for slow release of bacteria that affect plant growth. *Appl Environ Microbiol*. 1986. Vol. 51, № 5. P. 1089–1098. <https://doi.org/10.1128/aem.51.5.1089-1098.1986>
17. Bashan Y. Inoculants of plant growth-promoting bacteria for use in agriculture. *Biotechnol. Adv*. 1998. № 16. P. 729–770. [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(98\)00003-2](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(98)00003-2)
18. Bashan Y., de-Bashan L. E. How the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum* promotes plant growth — a critical assessment. *Adv Agron*. 2010. № 108. P. 77–136. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)08002-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)08002-8)
19. Bashan Y., de-Bashan L. E. Inoculant preparation and formulations for *Azospirillum* spp. F. D. Cassán, Y. Okon, C. M. Creus (Eds.). *Handbook for Azospirillum*. Berlin : Springer, 2015. P. 469–485. https://doi.org/10.1007/978-3-319-06542-7_26
20. Bashan Y., de-Bashan L. E., Prabhu S., Hernandez J.-P. Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: formulations and practical perspectives (1998–2013). *Plant Soil*. 2014. № 378. P. 1–33. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1956-x>
21. Berg G., Rybakova D., Grube M., Koberl M. The plant microbiome explored: implications for experimental botany. *J. Exp. Bot*. 2016. № 67. P. 995–1002. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv466>
22. Berger B., Patz S., Ruppel S., Kristin D., Faetke S., Junge H., Becker M. Successful formulation and application of plant growth-promoting *Kosakonia radicincitans* in maize cultivation. *BioMed Research Int*. Vol. 2018. ID 6439481. <https://doi.org/10.1155/2018/6439481>
23. Borriss R. Use of plant-associated *Bacillus* strains as biofertilizers and biocontrol agents in agriculture D. K. Maheshwari (Ed.). *Bacteria in Agrobiolology: Plant Growth Responses*. Berlin : Springer, 2011. P. 41–69. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20332-9_3
24. Cassán F., Coniglio A., López G., Molina R., Nievas S., de Carlan C. L. N. ... Mora V. Everything you must know about *Azospirillum* and its impact on agriculture and beyond. *Biol Fertil Soils*. 2020. № 56. P. 461–479. <https://doi.org/10.1007/s00374-020-01463-y>
25. Desbrosses G. J., Stougaard J. Root nodulation: a paradigm for how plant-microbe symbiosis influences host developmental pathways. *Cell Host Microbe*. 2011. № 10. P. 348–358. <https://doi.org/10.1016/j.chom.2011.09.005>
26. Dobreiner J., Day J. M., Dart P. J. Nitrogenase activity and oxygen sensitivity of the *Paspalum notatum* – *Azotobacter paspali* association. *J. Gen. Microbiol*. 1972. Vol. 71, № 1. P. 103–116.
27. Dommergues Y., Balandreau J., Rinau-

- do G., Weinhard P. Non-symbiotic nitrogen fixation in the rhizosphere of rice, maize and different tropical grasses. *Soil. Biol. Biochem.* 1973. Vol. 5, № 1. P. 83–89.
28. 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>
29. 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>
30. Herrmann L., Lesueur D. Challenges of formulation and quality of biofertilizers for successful inoculation. *Appl Microbiol Biotechnol.* 2013. Vol. 97, № 20. P. 8859–8873. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5228-8>
31. Ishaq S. L. Plant-microbial interactions in agriculture and the use of farming systems to improve diversity and productivity. *AIMS Microbiology.* 2017. Vol. 3, № 2. P. 335–353. <https://doi.org/10.3934/microbiol.2017.2.335>
32. Jacoby R., Peukert M., Succurro A., Koprivova A., and Kopriva S. The role of soil microorganisms in plant mineral nutrition — current knowledge and future directions. *Front. Plant Sci.* 2017. № 8. P. 1617. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01617>
33. John R. P., Tyagi R. D., Brar S. K., Surampalli R. Y., Prévost D. Bioencapsulation of microbial cells for targeted agricultural delivery. *Crit Rev Biotechnol.* 2011. Vol. 31, № 3. P. 211–226. <https://doi.org/10.3109/07388551.2010.513327>
34. Lamont J. R., Wilkins O., Bywater-Ekegard M., Smith D. L. From yogurt to yield: potential applications of lactic acid bacteria in plant production. *Soil Biol. Biochem.* 2017. № 111. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.03.015>
35. Okon Y., Heytler P. G., Hardy R. W. F. N₂-fixation by *Azospirillum brasilense* and incorporation into host *Setaria italica*. *Appl. Environ. Microbiol.* 1983. Vol. 46, № 3. P. 694–697. <https://doi.org/10.1128/aem.46.3.694-697.1983>
36. Santos M. S., Nogueira M. A., Hungria M. Outstanding impact of *Azospirillum brasilense* strains Ab-V5 and Ab-V6 on the Brazilian agriculture: lessons that farmers are receptive to adopt new microbial inoculants. *Rev Bras Ciênc Solo.* 2021. № 45. e0200128. <https://doi.org/10.36783/18069657RBCS20200128>
37. Santoyo G., Orozco-Mosqueda M. D., Govindappa M. Mechanisms of biocontrol and plant growth-promoting activity in soil bacterial species of *Bacillus* and *Pseudomonas*: a review. *Biocontrol Sci Technol.* 2012. № 22. P. 855–872. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2008.08.007>
38. Shivlata L., Satyanarayana T. Actinobacteria in agricultural and environmental sustainability. J. S. Singh, G. Seneviratne (Eds). *Agro-Environmental Sustainability*. Berlin : Springer, 2018. P. 173–218. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49724-2_9
39. Smith D. L., Gravel V., Yergeau E. Editorial: signaling in the phytomicrobiome. *Front. Plant Sci.* 2017. № 8. 611. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00611>
40. 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. Vol. 14, № 3. P. 138–147. <https://doi.org/10.1089/ind.2017.0032>
41. Theis K. R., Dheilly N. M., Klassen J. L., Brucker R. M., Baines J. F., Bosch, T. C. G. ... Bordenstein S. R. Getting the hologenome concept right: an ecoevolutionary framework for hosts and their microbiomes. *mSystems.* 2016. Vol. 1, № 2. e00028-16. <http://dx.doi.org/10.1128/mSystems.00028-16>
42. Vejan P., Abdullah R., Khadiran T., Ismail S. Encapsulation of *Bacillus salmalaya* 139SI using double coating biopolymer technique. *Lett Appl Microbiol.* 2019. Vol. 68, № 1. P. 56–63. <https://doi.org/10.1111/lam.13088>
43. Method of preparing a fertilizer and a plant growth promoting bacteria composition for adding to a base fertilizer: pat. PCT/IB2016/001875, WO 2017/051258 A2, F. Couture, M. Arshad; applicant: Doverfield exports-UAE; priority data 07.07.2015; publ. 05.07.2016.

Отримано 20.09.2022

EFFICIENCY OF MICROORGANISM-ENRICHED FERTILIZERS WHEN GROWING POTATOES

V. V. Volkohon, S. B. Dimova, T. S. Sasina, K. I. Volkohon,
L. A. Shevchenko, N. P. Shtanko, I. A. Zemska

Institute of Agricultural Microbiology and Agroindustrial Manufacture, NAAS, Chernihiv
e-mail: volkogon@ukr.net

Objective. Investigate the possibility of enriching mineral fertilizers (Azofoska: NPK 16:16:16) with agronomically useful microorganisms by applying their suspensions to solid fertilizer granules. **Methods.** Microbiological (cultivation of microorganisms on different media, obtaining suspensions, determination of titre in suspensions, microscopy), field small-plot experiment in six repetitions (growing potatoes on sod-podzolic soil), full accounting of the harvest from each plot, statistical. **Results.** Enrichment of Azofoska with microorganisms by applying aqueous suspensions of *Trichoderma harzianum* PD3 and representatives of the genus *Bacillus* to fertilizer granules before their application to sod-podzolic soil at the rate of $N_{80}P_{80}K_{80}$ had different effects on the yield of Bellarozza potatoes. *T. harzianum* PD3- and *Bacillus* sp. 102-enriched fertilizers contributed to a reliable increase in crop yield in a three-year experiment. The combination of these microorganisms to enrich Azofoska did not provide a stable effect over the years of research. The use of *B. vallismortis* 44- and *B. cereus* SB1-enriched fertilizers was not effective. The greatest increase in potato yield was ensured by the use of *Bacillus* sp. 102-enriched fertilizers. At the same time, minor deviations from the average parameter were reported for all six repetitions in the experiments (in contrast to other variants). **Conclusion.** The fundamental possibility of increasing the efficiency of mineral fertilizers by enriching them with agronomically useful microorganisms when growing potatoes on sod-podzolic soil has been shown. The efficiency of biologically modified Azofoska depended on the microorganism used for enrichment. Additional research both on the screening of microorganism strains promising for this purpose, as well as technological aspects (the number of cells of microorganisms on fertilizer granules, the use of adhesives, carbon sources and adjuvants during fertilizer enrichment, the terms of preservation of microorganisms on granules depending on the conditions of enrichment, extension of the spectrum of fertilizer types and types of agricultural crops, etc.) is necessary.

Key words: microorganisms on fertilizer granules, bacteria of the genus *Bacillus*, *Trichoderma harzianum*.

REFERENCES

1. Volkogon, V. V. (Ed.) (2006). *Mikrobnii preparaty u zemlerobstvi. Teoriya i praktyka* [Microbial preparations in agriculture. Theory and practice]. Kyiv: Ahrarna nauka [in Ukrainian].
2. Belyavskaya, L. A., Kozyritskaya, V. E., Valagurova, E. V., & Iutinskaya, G. A. (2012). *Biologicheski aktivnyye veshchestva preparata averkom* [Biologically active substances of the preparation Averkom]. *Microbiol J*, 74(3), 10–15 [in Russian].
3. Geltser, F. Yu. (1990). *Simbioz s mikroorganizmami — osnova zhizni rasteniy* [Symbiosis with microorganisms is the basis of plant life]. Moscow [in Russian].
4. Jumaniyazova, G., Narbayeva, Kh., Mahmudova, K., Zakiryayeva, S., & Babina, A. (2018).

- Vliyaniye modifitsirovannykh s pomoshch'yu bakterial'nogo udobreniya fosstim-3 biomineral'nykh udobreniy na rost i razvitiye prorstkov krasnogo gor'kogo pertsya* [Effect of biomineral fertilizers modified with the bacterial fertilizer fosstim-3 on the growth and development of seedlings of red bitter pepper]. *Web of Scholar*, 6(24), 4. http://doi.org/10.31435/rsglobal_wos/12062018/5731 [in Russian].
5. Iutinskaya, G. A., Ponomarenko, S. P. (Eds.) *Bioregulyatsiya mikrobnno-rastitel'nykh sistem* [Bioregulation of microbial and plant systems]. Kiev: Nichlava [in Russian].
6. Kurdish, I. K. (2010). *Introduktsiya mikroorganizmiv u ahroekosystemy* [Introduction of microorganism in agroecosystem]. Kyiv: Naukova dumka [in Ukrainian].

7. Mishustin, E. N. (1972). *Mikroorganizmy i produktivnost' zemledeliya* [Microorganisms and agricultural productivity]. Moscow: Nauka [in Russian].
8. Patyka, V. P. (Ed.) (2003). *Biologichnyy azot* [Biological nitrogen]. Kyiv: Svit [in Ukrainian].
9. Tokmakova, L. M., Shevchenko, L. A. (2019). Vplyv Polimiksobakterynu na produktyvnyshch kukurudzy za riznoho sposobu zastosuvannya [The influence of Polymyxobacterin on the productivity of corn by different methods of application]. *Ahroekologichnyi zhurnal — Agroecological Journal*, 1, 80–84 [in Ukrainian].
10. Shevchenko, L. A. (2017). Rozvytok korenevoyi systemy roslyn kukurudzy za vplyvu Polimiksobakterynu — stymulyatora rostu roslyn [Development of the root system of corn plants under the influence of Polymyxobacterin, a plant growth stimulator]. *Silskohospodarska mikrobiologiya — Agricultural microbiology*, 26, 42–48. <https://doi.org/10.35868/1997-3004.26.42-48> [in Ukrainian].
11. Pat. 110246 UA, MPK (2016.01), C05C 1/00. Kombinovane ridke biomineralne dobrovyro [Combined liquid biomineral fertilizer]. Skrypka, O. M., Tokmakova, L. M., Volkogon, V. V. Publ. 26.09.2016 [in Ukrainian].
12. Pat. 110252 UA, MPK C05F 11/08 (2006.01), C12N 1/20 (2006.01). Sposib vyhotovlennia biomineralnykh dobrov z vlastyvoistyamy 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].
13. 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>
14. Babalola, O. O. (2010). Beneficial bacteria of agricultural importance. *Biotechnol Lett*, 32, 1559–1570. <https://doi.org/10.1007/s10529-010-0347-0>
15. 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*, 1473. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473>
16. 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>
17. Bashan, Y. (1998). Inoculants of plant growth-promoting bacteria for use in agriculture. *Biotechnol Adv*, 16, 729–770. [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(98\)00003-2](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(98)00003-2)
18. Bashan, Y., de-Bashan, L. E. (2010). How the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum* promotes plant growth — a critical assessment. *Adv Agron*, 108, 77–136. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)08002-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)08002-8)
19. Bashan, Y., de-Bashan, L. E. (2015). Inoculant preparation and formulations for *azospirillum* spp. In F. D. Cassán, Y. Okon, C. M. Creus (Eds.). *Handbook for Azospirillum* (pp. 469–485). Berlin: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-06542-7_26
20. Bashan, Y., De-Bashan, L. E., Prabhu, S., & Hernandez, J.-P. (2014). Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: formulations and practical perspectives (1998–2013). *Plant Soil*, 378, 1–33. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1956-x>
21. Berg, G., Rybakova, D., Grube, M., & Koberl, M. (2016). The plant microbiome explored: implications for experimental botany. *J. Exp. Bot*, 67, 995–1002. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv466>
22. Berger, B., Patz, S., Ruppel, S., Kristin, D., Faetke, S., Junge, H., & Becker, M. (2018). Successful formulation and application of plant growth-promoting *Kosakonia radicincitans* in maize cultivation. *BioMed Research Int*, 2018, 6439481. <https://doi.org/10.1155/2018/6439481>
23. Borriss, R. (2011). Use of plant-associated *Bacillus* strains as biofertilizers and biocontrol agents in agriculture. In D. K. Maheshwari (Ed.). *Bacteria in Agrobiolgy: Plant Growth Responses* (pp. 41–69). Berlin: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20332-9_3
24. Cassán, F., Coniglio, A., López, G., Molina, R., Nievas, S., de Carlan, C. L. N. ... Mora, V. (2020). Everything you must know about *Azospirillum* and its impact on agriculture and beyond. *Biol Fertil Soils*, 56, 461–479. <https://doi.org/10.1007/s00374-020-01463-y>
25. Desbrosses, G. J., Stougaard, J. (2011). Root nodulation: a paradigm for how plant-microbe symbiosis influences host developmental pathways. *Cell Host Microbe*, 10, 348–358. <https://doi.org/10.1016/j.chom.2011.09.005>
26. Dobereiner, J., Day, J. M. & Dart, P. J. (1972). Nitrogenase activity and oxygen sensitivity of the *Paspalum notatum* – *Azotobacter paspali* association. *J Gen Microbiol*, 71(1), 103–116.
27. Dommergues, Y., Balandreau, J., Rinaudo, G., & Weinhard, P. (1973). Non-symbiotic nitrogen fixation in the rhizosphere of rice, maize and different tropical grasses. *Soil Biol Biochem*, 5(1), 83–89.
28. 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>
29. 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>
30. 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>
31. Ishaq, S. L. (2017). Plant-microbial interactions in agriculture and the use of farming systems to improve diversity and productivity. *AIMS Microbiology*, 3(2), 335–353. <https://doi.org/10.3934/microbiol.2017.2.335>
32. Jacoby, R., Peukert, M., Succurro, A., Koprivova, A., & Kopriva S. (2017). The role of soil microorganisms in plant mineral nutrition — current knowledge and future directions. *Front Plant Sci*, 8, 1617. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01617>
33. John, R. P., Tyagi, R. D., Brar, S. K., Surampalli, R. Y., & Prévost, D. (2011). Bioencapsulation of microbial cells for targeted agricultural delivery. *Crit Rev Biotechnol*, 31(3), 211–226. <https://doi.org/10.3109/07388551.2010.513327>
34. Lamont, J. R., Wilkins, O., Bywater-Ekegard, M., & Smith, D. L. (2017). From yogurt to yield: potential applications of lactic acid bacteria in plant production. *Soil Biol Biochem*, 111, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.03.015>
35. Okon, Y., Heytler, P. G., & Hardy, R. W. F. (1983). N₂-fixation by *Azospirillum brasilense* and incorporation into host *Setaria italica*. *Appl Environ Microbiol*, 46(3), 694–697. <https://doi.org/10.1128/aem.46.3.694-697.1983>
36. Santos, M. S., Nogueira, M. A., & Hungria, M. (2021). Outstanding impact of *Azospirillum brasilense* strains Ab-V5 and Ab-V6 on the Brazilian agriculture: lessons that farmers are receptive to adopt new microbial inoculants. *Rev Bras Ciênc Solo*, 45, e0200128. <https://doi.org/10.36783/18069657RBCS20200128>
37. Santoyo, G., Orozco-Mosqueda, M. D., & Govindappa, M. (2012). Mechanisms of biocontrol and plant growth-promoting activity in soil bacterial species of *Bacillus* and *Pseudomonas*: a review. *Biocontrol Sci Technol*, 22, 855–872. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2008.08.007>
38. Shrivlata, L., Satyanarayana, T. (2018). Actinobacteria in agricultural and environmental sustainability. In J. S. Singh, G. Seneviratne (Eds.). *Agro-Environmental Sustainability* (pp. 173–218). Berlin: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49724-2_9
39. Smith, D. L., Gravel, V., & Yergeau, E. (2017). Editorial: signaling in the phytomicrobiome. *Front Plant Sci*, 8, 611. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00611>
40. 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>
41. Theis, K. R., Dheilily, N. M., Klassen, J. L., Brucker R. M., Baines J. F., Bosch, T. C. G. ... Bordenstein S. R. (2016). Getting the hologenome concept right: an ecoevolutionary framework for hosts and their microbiomes. *mSystems*, 1(2), e00028-16. <http://dx.doi.org/10.1128/mSystems.00028-16>
42. 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>
43. Pat. PCT/IB2016/001875, WO 2017/051258 A2. Method of preparing a fertilizer and a plant growth promoting bacteria composition for adding to a base fertilizer, Couture, F., Arshad, M., Publ. 05.07.2016.

Received 20.09.2022