

АГРОНОМІЯ

УДК 633.1:631.4.604/631.8

Вплив біопрепаратів Азотохелп® та Граундфікс® на формування мікробних угруповань ризосфери пшениці озимоїЯковенко Д.О.^{1,2} , Бородай В.В.^{1,3} ¹ Інститут агроєкології і природокористування НААН України² Біотехнологічна компанія BTU³ Національний університет біоресурсів і природокористування України E-mail: Яковенко Д.О. d.yakovenko@btu-center.com; Бородай В.В. veraboro@gmail.com

Яковенко Д.О., Бородай В.В. Вплив біопрепаратів Азотохелп® та Граундфікс® на формування мікробних угруповань ризосфери пшениці озимої. «Агробіологія», 2025. № 2. С. 246–257.

Yakovenko D., Boroday V. The effect of Azotohelp® and Groundfix® biofertilizers on the formation of microbial communities in the rhizosphere of winter wheat. «Agrobiology», 2025. no. 2, pp. 246–257.

Рукопис отримано: 01.10.2025 р.

Прийнято: 16.10.2025 р.

Затверджено до друку: 27.11.2025 р.

doi: 10.33245/2310-9270-2025-199-2-246-257

Останнім часом у всьому світі зростає інтерес до використання біодобрив, які мають прямий та опосередкований вплив на родючість ґрунту, регуляцію стійкості та продуктивності зернових культур в умовах змін клімату. Упродовж 2021–2022 рр. в умовах Хмельницької ДСГДС ІКСГП НААН (Західний Лісостеп України) було досліджено ефективність внесення біопрепаратів Азотохелпу® та Граундфіксу® (біотехнологічна компанія BTU, Україна) під передпосівну культивуацію на динаміку розвитку мікробних угруповань ризосфери пшениці озимої.

Встановлено суттєвий вплив біопрепаратів Граундфіксу та Азотохелпу на структуру еколого-трофічних груп, функціональну спрямованість мікробного ценозу ризосфери пшениці озимої, рівень доступних поживних речовин, а в подальшому на продуктивність культури. Зокрема, співвідношення нітрифікаторів та амоніфікаторів у фазу цвітіння у варіантах з Граундфіксом (3 л/т) та Азотохелпом (3 л/т) становило 0,58 та 0,92 відповідно порівняно з контролем (0,49). Комбіноване застосування Граундфіксу® 1,5 л/га + Азотохелпу® 1,5 л/га у 2022 рр. у фазу цвітіння стимулювало розвиток мікроорганізмів, що використовують мінеральні форми азоту та гетеротрофних мікроорганізмів, які використовують органічний азот, їх кількість була у 3,8 та 5,8 разів більшою відповідно порівняно до контрольного варіанту. Також в 3 рази збільшився вміст бактерій роду *Azotobacter* у порівнянні з контролем. Приріст урожаю за дії біопрепаратів в середньому за два роки до контролю становив 0,58–0,94 т/га.

Виявлено пролонговану позитивну дію за використання Граундфіксу® 1,5 л/га + Азотохелпу® 1,5 л/га у фазу ВВСН 87–89. Попри зменшення утворення корневих ексудатів в цей період, спостерігали стабільну чисельність еколого-трофічних груп мікроорганізмів, що приводить до уповільнення біологічної виснаженості ґрунту після збирання врожаю, формування органо-мінерального балансу, створює передумови для кращої структури ґрунту та ефективної деструкції післязжнивних решток.

Ключові слова: *Triticum aestivum* L., еколого-трофічні групи мікроорганізмів, ризосфера рослин, поліфункціональні біопрепарати.

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень. Зниження продуктивності пшениці озимої на 20–50 % від несприятливих стресових чинників, таких як посуха, збільшення частоти, інтенсивності та непередбачуваності повеней, засоленість та інші, призводить до значних втрат врожаю і становить серйозну загрозу для сільського господарства та продовольчої безпеки [1–5].

Останнім часом у всьому світі зростає інтерес до використання біологічних поліфункціональних препаратів для живлення рослин (біопрепаратів), які мають прямий та опосередкований вплив на родючість ґрунту, беруть активну участь у регуляції стійкості та продуктивності зернових культур в умовах змін клімату [6–9].

Інокуляція насіння пшениці бактеріальними та грибовими консорціумами *Azospirillum* spp. + *Azoarcus* spp. + *Azorhizobium* spp., *Rhizopagus irregularis* + *Azotobacter vinelandii* та *R. irregularis* + *Bacillus megaterium* + *Frateuria aurantia*, які були основою біопрепаратів, значно покращила ріст рослин та накопичення нітрогену у фазі росту ВВСН 30-59, однак не мала значного впливу на врожайність та сталість біорізноманіття резидентного мікробіома. Водночас біопрепарати значно вплинули на підвищення рівня двох високоякісних білкових субодиниць, а саме високомолекулярної й низькомолекулярної субодиниць глютеніну 81 кДа та 43,6 кДа. Ці ефекти були пов'язані зі збільшенням мікробної біомаси ризосфери та активності ферментів, таких як β -глюкозидаза, α -маннозидаза, β -маннозидаза та ксилозидаза, які беруть участь у розкладанні органічної речовини [10].

Досліджено, що за використання біопрепаратів на основі *Azospirillum brasilense*, *Bacillus subtilis*, *B. licheniformis*, *B. mucilaginosus* в агроценозі пшениці озимої найбільш домінуючими філами у ґрунті були Proteobacteria, Acidobacteria, Actinobacteria, Bacteroidetes та Chloroflexi. Впродовж різних фаз росту пшениці за дії біопрепаратів спостерігалось коливання їх кількості [11].

Збільшення валового виробництва зерна пшениці озимої (*Triticum aestivum* L.) є одним з основних стратегічних завдань, особливо в умовах воєнного стану, що забезпечить продовольчу та економічну безпеку України. Актуальність застосування біопрепаратів у технологіях вирощування пшениці озимої в Україні обумовлена також розширенням використання агротехнологій органічного й інтегрованого землеробства та розробленням заходів з адаптації рослин до змін клімату.

Метою досліджень було вивчення впливу різних способів внесення біопрепаратів Азо-

тохелпу® та Граундфіксу® на динаміку розвитку мікробних угруповань ризосфери пшениці озимої в умовах Західного Лісостепу України.

Матеріал і методи дослідження. Дослідження проводились на дослідному полі Хмельницької ДСГДС ІКСГП НААН (Хмельницької державної сільськогосподарської дослідної станції Інституту кормів та сільського господарства Поділля, с. Самчики, Старокостянтинівський р-н, Хмельницька обл., північно-західна частина Правобережного Лісостепу України) впродовж 2020–2022 рр. У дослідді висівали пшеницю озиму сорту Богдана. Основний обробіток ґрунту – оранка. Ґрунт дослідної ділянки – чорнозем слабоопідзолений середньосуглинковий, середньопотужний, малогумусний на лісовому суглинку буровато-пального забарвлення. Агрохімічна характеристика ґрунту: гумус (за Тюрнімом) – 2,8–2,9 %, рН – 5,8–6,2; гідролітична кислотність – 1,9–2,3 мг/екв. на 100 г; валові запаси нітрогену – 0,153–0,163 %, фосфору – 0,136–0,149 %; лужногідролізованого нітрогену 17–19,3 мг, рухомі форми фосфору та калію (за Чириковим) – відповідно 20,8–22,6 та 8–12 мг на 100 г. За механічним складом – це середньосуглинковий грудкувато-пилуватої структури ґрунт.

Весна 2021 р. була дещо прохолоднішою за норму, особливо в березні (в середньому 2,3 °C проти 0,4 °C), а опадів (188,6 мм) у травні випало майже втричі більше за норму. Літо 2021 р. було дуже вологим і теплим, із значною кількістю опадів у липні (349,2 мм), що вплинуло на пригнічення росту певних аеробних мікроорганізмів. Весна 2022 р. виявилась теплою, помірно вологою, а літо більш стабільним, порівняно з 2021 р., однак в середньому кількість опадів з весни була недостатньою. Досліди з Граундфіксом® та Азотохелпом® (Азотофіт®) (біотехнологічна компанія ВТУ, Україна) було закладено в останній декаді вересня – першій половині жовтня, збирання та облік урожаю пшениці озимої було проведено в останній декаді липня згідно із загальноприйнятою агротехнікою для умов Західного Лісостепу [12,13].

Дослідження проводили за наступною схемою: 1 – контроль; 2 – Граундфікс® 3 л/га під передпосівну культивуацію; 3 – Азотохелп® 3 л/га під передпосівну культивуацію; 4 – Граундфікс® 1,5 л/га + Азотохелп® 1,5 л/га під передпосівну культивуацію. Повторність – чотирикратна.

До складу біопрепарату Граундфікс® входять мікроорганізми: *Bacillus velezensis* (*B. subtilis*), *B. subtilis*, *Priestia megaterium* (*B. megaterium* var. *phosphaticum*), *Agrobacterium pu-*

sense (*Azotobacter chroococcum*), *Agr. salinitolerans* (*Enterobacter*), *Paenibacillus polymyxa*. (титр $0,5\text{--}1,5 \times 10^9$ КУО/см³). Основою біопрепарату Азотохелп® є азотфіксуючі бактерії *Agrobacterium pusense* (*Azotobacter chroococcum*) та біологічно активні продукти їх життєдіяльності (титр $1,0 \times 10^9$ КУО/см³).

Визначення динаміки чисельності мікроорганізмів основних еколого-функціональних груп та основних індексів мікробіологічних процесів проводили у зразках ґрунту ризосфери пшениці, відібраних у фазах росту ВВСН 61-69 та ВВСН 83-89, в Інституті прикладної біотехнології біотехнологічної компанії ВТУ згідно з ДСТУ 7847:2015 та загальноприйнятими у мікробіології методами [14, 15].

Статистичну обробку даних проводили, використовуючи програму Microsoft Office Excel®2010 для Microsoft Windows®, середні значення порівнювали за допомогою дисперсійного аналізу (ANOVA) з $p \leq 0,05$.

Результати дослідження та обговорення. Встановлено суттєвий вплив біопрепаратів Граундфіксу та Азотохелпу на структуру еколого-трофічних груп і функціональну спрямованість мікробного ценозу ризосфери пшениці озимої, а в подальшому на продуктивність культури.

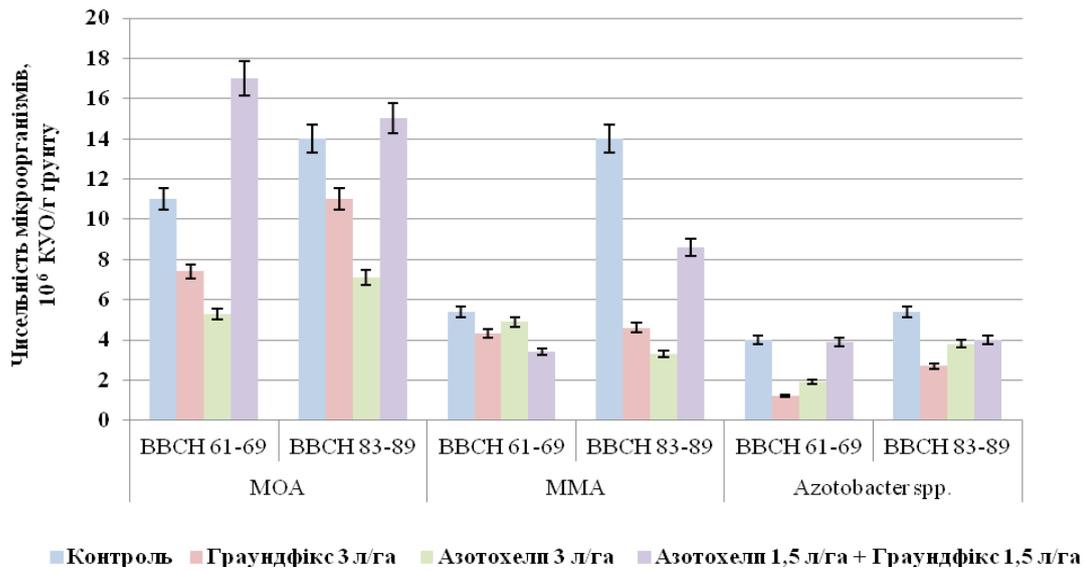
У фазу формування пагонів (кущення) озимої пшениці восени 2020 р. кількість опадів була значно нижчою за норму, що ослабило рослини. Через прохолодну весну 2021 року, недостатню кількість опадів у березні і квітні, ґрунтову посуху у травні і з рекордною кількістю опадів у липні (349,2 мм), ґрунтові умови виявились несприятливими щодо мікробіологічної активності. Відомо, що перезволоження призводить до змін у ґрунтовій мікробній спільноті, впливає як на її загальну структуру, так і на активність стимуляції росту рослин [16]. Співвідношення мікроорганізмів, які використовують мінеральні форми азоту (ММА) та гетеротрофних мікроорганізмів, які використовують органічний азот (МОА), передусім амоніфікаторів, у фазу ВВСН 61-69 у 2021 р. за варіантами Граундфікс (3 л/т) та Азотохелп (3 л/т) становили 0,58 та 0,92 відповідно порівняно з контролем (0,49), що свідчить про врівноваження процесів, стабільний рівень доступних поживних речовин (рис. 1).

Застосування як окремих, так і сумісних варіантів Граундфіксу та Азотохелпу у 2021 р. привело до зростання кількості целюлозоруйнівних мікроорганізмів ($1,0\text{--}1,2 \times 10^4$ КУО на 1 г сухого ґрунту порівняно з контролем – $7,2 \times 10^3$ КУО на 1 г сухого ґрунту) у фазу ВВСН 61-69, і майже в 1,6 рази у фазу ВВСН 83-89

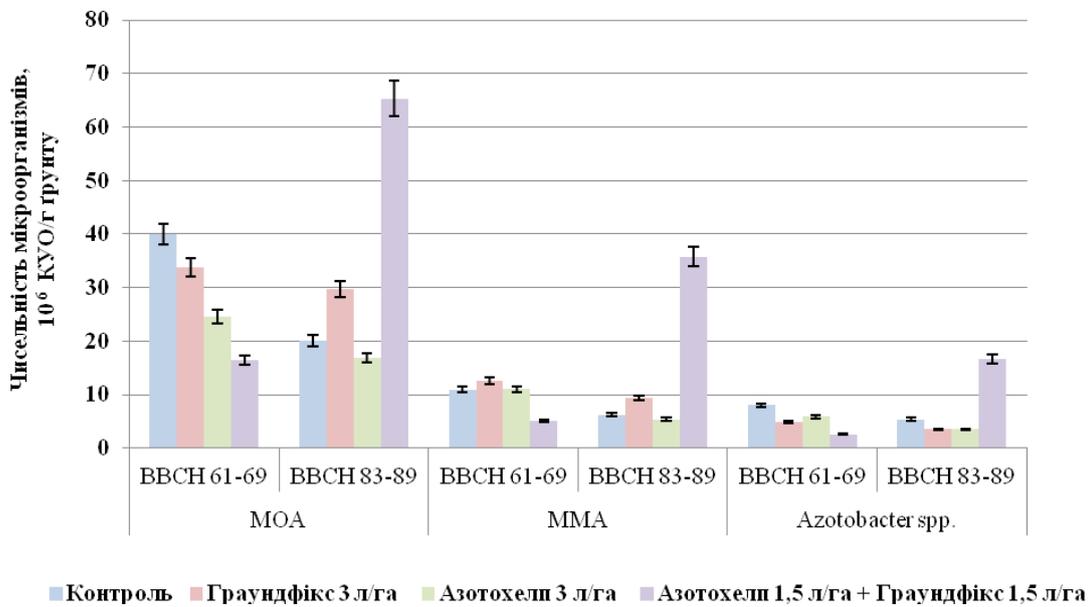
за використання Граундфіксу (3 л/т) та Азотохелпу (3 л/т). Відомо, що за дії активних штамів целюлозоруйнівних мікроорганізмів процеси мінералізації-імобілізації відбуваються більш інтенсивно [17, 18]. Це свідчить про інтенсифікацію процесів мінералізації в ґрунті, кращу забезпеченість рослин доступними формами азоту. У варіантах із застосуванням біопрепаратів у 2021 р. виявлено більшу чисельність актиноміцетів ($2,2\text{--}2,9 \times 10^5$ проти $1,9 \times 10^5$ КУО/г сухого ґрунту у контролі), які мають високу фізіологічну активність, продукують антибіотики, відіграють значну роль в оздоровленні ґрунтів.

За сумісного використання Граундфікс 1,5 л/га + Азотохелп 1,5 л/га вміст бактерій роду *Azotobacter* був на рівні контролю ($3,9 \times 10^5$ КУО/г сухого ґрунту) порівняно з іншими варіантами ($1,0\text{--}1,9 \times 10^5$ КУО/г сухого ґрунту). Це може бути обумовлено впливом несприятливих кліматичних умов 2021 р. та конкуренцією з природними місцевими штамми. Аналогічні результати спостерігали S. Silletti та ін. (2021), в дослідженнях яких *Azotobacter chroococcum* виявився менш ефективним щодо росту пшениці озимої в надмірно зволжених умовах за неоптимального удобрення та підвищував стійкість рослин лише за екстремального посухового стресу [19].

Окрім прямого впливу на мікробні угруповання ґрунту, складові біопрепаратів на основі бактерій з поліфункціональною дією мають опосередкований вплив на стійкість рослин до біотичних та абіотичних чинників, підвищуючи їх ефективність і адаптивність у польових умовах та призводячи до посиленого загального ефекту. У фазі розвитку ВВСН 61–83 пшениця озима проходить від фази цвітіння до початку дозрівання, що є ключовими етапами формування врожаю. У цей час дуже важливим є оптимальне живлення та вологозабезпечення, яким значно сприяло застосування біопрепаратів Граундфіксу та Азотохелпу, що вплинуло на продуктивність рослин. У 2021 р. приріст урожайності до контролю становив $0,50\text{--}0,93$ т/га. Аналогічний вплив було показано за поєднання кількох PGPM з різними механізмами дії, а саме *Erwinia* spp. EU-B2SNL1 (N-фіксатор), *Chryseobacterium arthrospiraerae* EU-LWNA-37 (P-солнобілізатор) та *Pseudomonas gessardii* EU-MRK-19 (K-солнобілізатор). Їх використання покращило ріст та фізіологічні параметри рослин, включаючи довжину та біомасу коренів/пагонів, вміст хлорофілу, каротиноїдів, фенолів, флавоноїдів та вміст розчинного цукру на посівах ячменю [20].



А



В

Рис. 1. Динаміка чисельності фізіологічних груп мікроорганізмів ризосфери пшениці озимої, залучених у трансформацію сполук Нітрогену, за дії біопрепаратів, внесених під передпосівну культивуацію (А – 2021 р., В – 2022 р.).

Весна 2022 р. виявилась теплою й помірно вологою, а літо більш стабільним, порівняно з попереднім роком, що створило оптимальні умови і сприяло біологічній активності ґрунтової мікробіоти та формуванню врожаю. Комбіноване застосування Граундфікс® 1,5 л/га + Азотохелп® 1,5 л/га у 2022 р. стимулювало розвиток мікроорганізмів, які використовують мінеральні форми азоту та гетеротрофних мікроорганізмів, які використовують органічний азот, їх кількість була в 3,8 та 5,8 разів більшою відпо-

відно порівняно до контрольного варіанту. Також у 3 рази збільшився вміст бактерій роду *Azotobacter* у порівнянні з контролем (відповідно 16,6 проти 5,4 КУО/г сухого ґрунту) [9].

Встановлено диференційований вплив біопрепаратів Граундфіксу та Азотохелпу на активність і структуру мікробних угруповань, залучених у процеси мікробної трансформації органічної речовини, а саме на оліготрофні та педотрофні мікроорганізми ризосфери пшениці озимої (рис. 2).

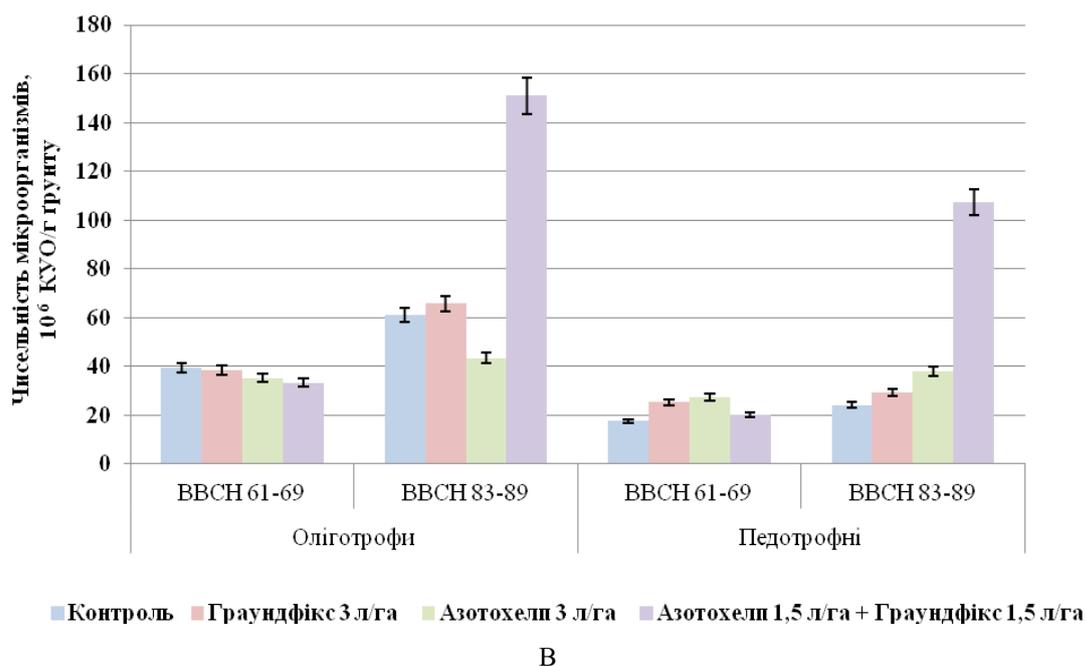
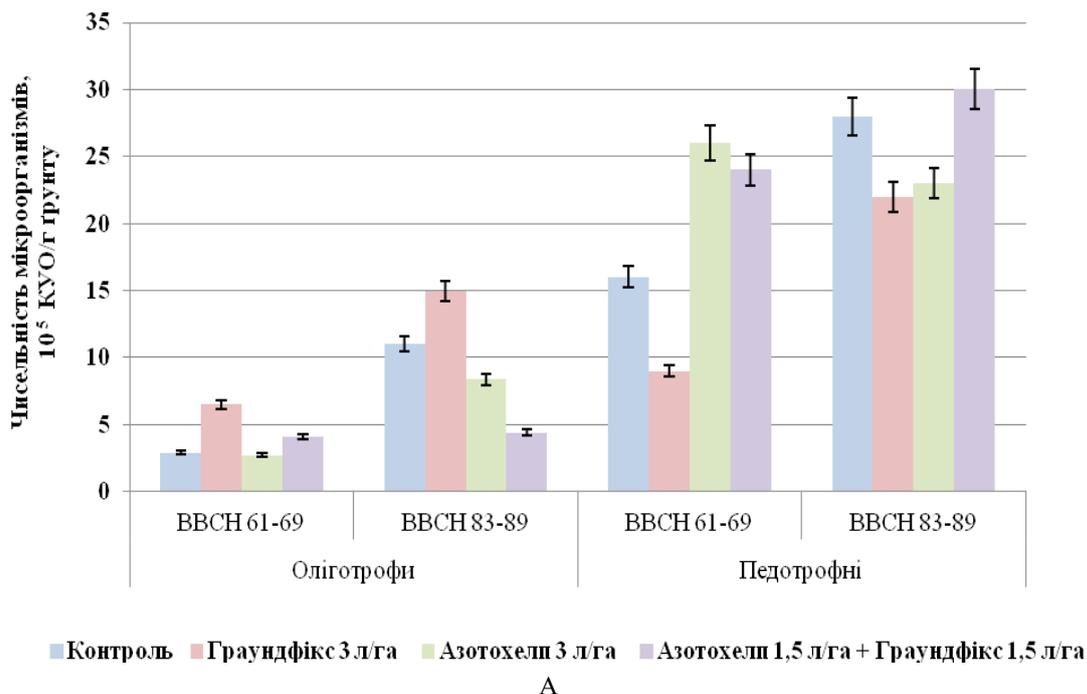


Рис. 2. Динаміка чисельності еколого-трофічних груп мікроорганізмів ризосфери пшениці озимої, що беруть участь у мікробній трансформації органічної речовини, за дії біопрепаратів, внесених під передпосівну культивування (А – 2021 р., В – 2022 р.).

У фазу BBCH 61-69 (2021 р.) у варіанті з Граундфіксом (3 л/т) виявлено активізацію оліготрофних мікроорганізмів, які розвиваються за низьких концентрацій доступних поживних речовин (наприклад, бактерії родів *Bacillus* та *Streptomyces*), сприяють повільній мінералізації гумусових речовин, розкладанню органічних полімерів (коефіцієнт

оліготрофності збільшився у 2,0 рази порівняно з контрольним варіантом) [9]. Це може бути показником формування мікробіоценозу, орієнтованого на глибоку трансформацію органічної речовини та стабілізацію гумусу. Найактивніший розвиток педотрофних мікроорганізмів, до яких в основному належать амоніфікатори, інші мікроорганізми, що роз-

кладають свіжу органічну речовину, спостерігався за дії Азотохелпу (3 л/т), що може бути обумовлено посиленням мінералізаційних процесів.

Водночас, у варіанті із сумісним внесенням Азотохелпу (1,5 л/т) та Граундфіксу (1,5 л/т) співвідношення еколого-трофічних груп мікроорганізмів ризосфери пшениці озимої, залучених у трансформацію сполук Нітрогену та тих, що беруть участь у мікробній трансформації органічної речовини, були на рівні контрольного варіанту, що свідчить про збалансоване співвідношення між процесами мінералізації та гуміфікації, розвиток мікробіому за відсутності надмірної активації деструктивних процесів.

У фазу ВВСН 83-89 (2021 р.) за зменшення легкодоступних субстратів, що надходять з кореневими виділеннями, спостерігалась активізація процесів мікробної трансформації органічної речовини, виражена зміна чисельності оліготрофів та педотрофів (у варіанті з Азотохелпом (3 л/т) та Граундфіксом (3 л/т)). За комбінованого внесення біопрепаратів Азотохелпу (1,5 л/т) та Граундфіксу (1,5 л/т) мікробіота зберігала збалансовану структуру, встановлено помірну активацію обох еколого-трофічних груп.

За більш сприятливих умов у 2022 р. у фазу ВВСН 61-69 мікробіологічна активність ґрунту за дії біопрепаратів Граундфіксу та Азотохелпу характеризувалась помірною інтенсивністю процесів мінералізації, спостерігали зниження показників коефіцієнта трансформації органічної речовини в 1,5–2,7 рази порівняно з контрольним варіантом. У фазу ВВСН 83-89 синергічний ефект на ґрунтову мікробіоту за впливу комбінованого застосування Граундфікс® 1,5 л/га + Азотохелп® 1,5 л/га проявився у збільшенні чисельності багатьох еколого-функціональних груп, зокрема загальна кількість бактерій зросла від 27,4 до 141,7 млн КУО/г сухого ґрунту. Це свідчить про збалансований вплив біопрепаратів на ґрунтову мікробіоту, що сприяє покращенню її функціональної різноманітності та стійкості.

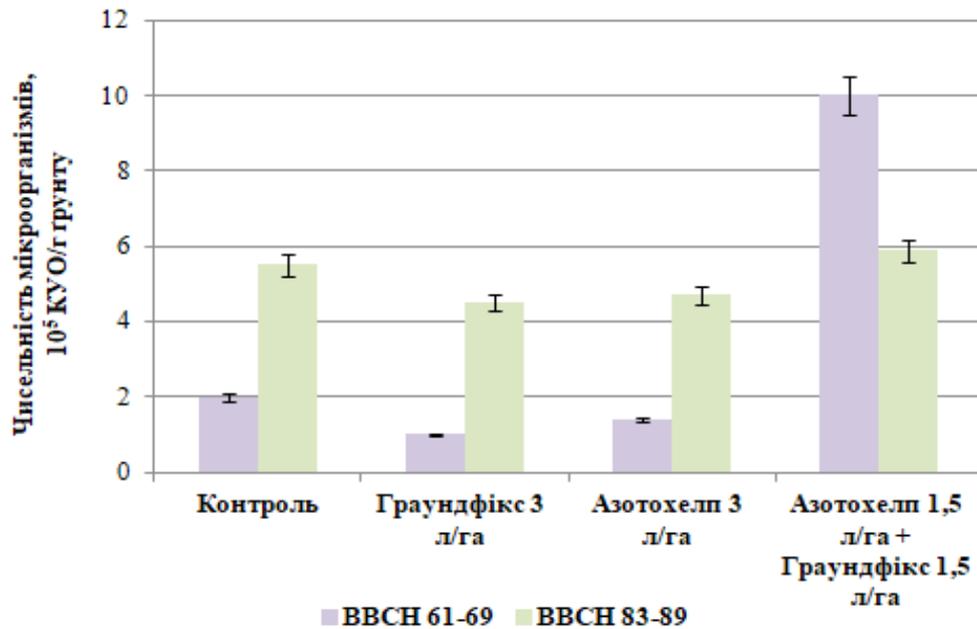
Перед збиранням врожаю, у контрольному варіанті, порівняно із сумісним застосуванням Граундфіксу та Азотохелпу, спостерігали найнижчу загальну кількість бактерій, відповідно – 13,1 проти 141,7 млн КУО/г, чисельність бактерій роду *Azotobacter* – 5,4 проти 16,6 млн КУО/г сухого ґрунту, сповільнення процесів трансформації, зниження інтенсивності мікробіологічних процесів,

чисельності основних еколого-функціональних груп мікроорганізмів, що було зумовлено виснаженням легкодоступних поживних речовин за відмирання кореневої системи та зниженням активності кореневої ексудації, конкуренцією між мікроорганізмами. Водночас сумісне застосування біопрепаратів Граундфіксу та Азотохелпу привело до стимулювання розвитку мікроорганізмів, які використовують різні форми Нітрогену, підвищення частки оліготрофів і педотрофів (на 15–20 % вище контролю). Встановлено значне зростання коефіцієнта трансформації органічної речовини (в 5,7 разів порівняно з червнем). Це вказує на пролонгований ефект біопрепаратів Азотохелп та Граундфікс щодо збереження біологічної активності ґрунту у пізні фази вегетації пшениці озимої, що сприяє підтриманню біологічного потенціалу ґрунту після завершення вегетаційного періоду, уповільнює процеси біологічного виснаження.

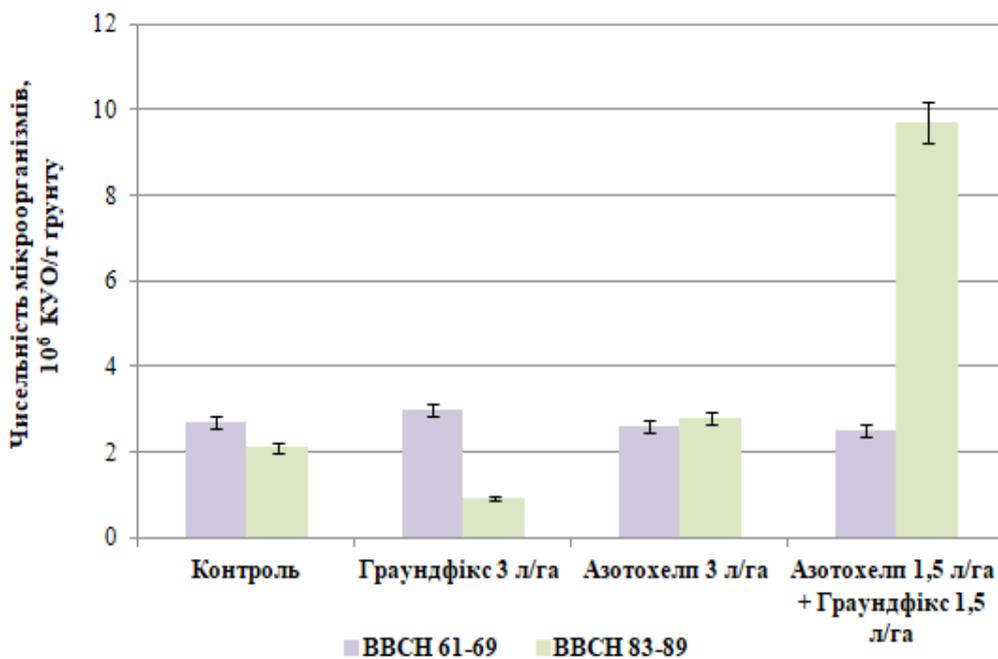
За два роки досліджень кількість спороутворювальних бактерій за окремого внесення біопрепаратів була дещо нижчою, або на рівні контрольного варіанту ($9,7 \times 10^4$ – $3,0 \times 10^6$ КУО/г проти $2,0 \times 10^5$ – $2,7 \times 10^6$ КУО/г сухого ґрунту у контролі) (рис. 3).

Тимчасом за сумісного застосування Граундфіксу та Азотохелпу – цей показник становив $5,9 \times 10^5$ – $9,7 \times 10^6$ КУО/г сухого ґрунту. Спороутворювальні бактерії, які переважно представлені родом *Bacillus*, вважаються показником глибини розвитку процесу ґрунтоутворення. Висока інтенсивність спороутворення, розвиток актиноміцетів та нітрифікаторів (у фазу ВВСН 83-89 (2022 р.) кількість мікроорганізмів, що споживають мінеральний азот, зросла в 5,8 разів порівняно з контролем) опосередковано може свідчити про більш кращий азотний режим в ґрунті за комбінованого застосування Граундфіксу та Азотохелпу.

Врожайність пшениці озимої і біологічна активність ґрунту перебувають у прямій залежності, тому важливого значення набувають способи активізації біологічних процесів у ньому [21]. Бактерії, складові біопрепаратів, стимулюють ріст та підвищують продуктивність рослин завдяки асиміляції елементів живлення, продукуванню біологічно активних речовин, індукції каскаду захисних реакцій та розвитку системного імунітету рослин, що сприяє мінімізації шкідливого впливу за дії біотичних та абіотичних стресів [16, 22].



А



В

Рис. 3. Динаміка чисельності спороутворювальних бактерій ризосфери пшениці озимої за дії біопрепаратів, внесених під передпосівну культивування (А – 2021 р., В – 2022 р.).

За застосування Граундфікс® та Азотохелп® під передпосівну культивування спостерігається формування більш сприятливих умов для активного функціонування мікробіоти ризосфери пшениці озимої, активізації мікробіологічних процесів, активного транспортування

асимілянтів, що безпосередньо вплинуло на величину врожаю культури. Найвищими виявились показники урожайності у варіанті із сумісним застосуванням Граундфікс® 1,5 л/га + Азотохелп® 1,5 л/га – 6,61 т/га (за окремого внесення відповідно – 6,25 та 6,41 т/га) (рис. 4).

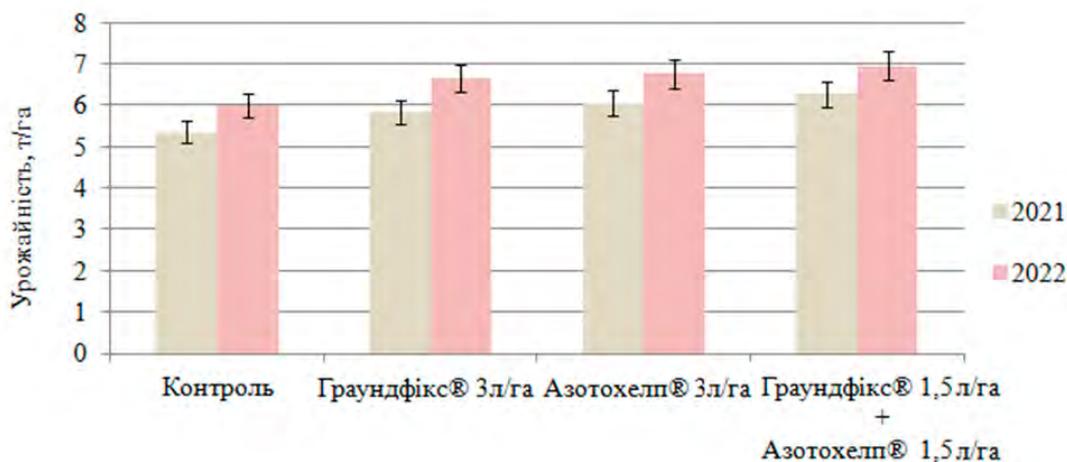


Рис. 4. Урожайність пшениці озимої за дії біодобрив Граундфіксу та Азотохелпу.

У варіанті з Азотохелпом® (3 л/га) урожайність пшениці озимої виявилась більшою порівняно з Граундфіксом® (3 л/га). Це може бути обумовлено утворенням метаболітів, які опосередковано підвищують стійкість рослин до стресів різної природи, активними штамми препарату *Agrobacterium pusense* (*Azotobacter chroococcum*). Згідно з науковими джерелами, такими метаболітами можуть бути індол-3 оцтова кислота, яка стимулює ріст кореневої системи, покращує поглинання води, сидерофори, вітаміни, що діють як антиоксиданти, захищаючи клітини від оксидативного стресу, екзополісахариди, антибіотики.

Саме комплексною взаємодією бактерій-складових Граундфіксу® і Азотохелпу® та їх метаболітів можна пояснити покращення росту й розвитку пшениці озимої. Аналогічні дані отримано іншими дослідниками. Зокрема, М. Уауа та ін. (2022) дослідили, що використання біопрепаратів на основі фосфатомобілізуючих бактерій сприяло не лише солюбілізації фосфатів у ґрунті, а й покращенню ростових параметрів рослин пшениці, підвищенню вмісту доступного фосфору в ґрунті та активності фосфатів.

PGPB, які є основою біопрепаратів, впливають на регуляцію механізму толерантності зернових культур до абіотичних стресів, забезпечують необхідними мінеральними поживними речовинами та підвищують їх адаптивність і продуктивність в умовах посухи, стимулюючи антиоксидантну систему захисту та фотосинтетичну активність [23]. Утворення біоплівки для стійкості до абіотичних

стресів (перезволоження, холодого стресу та інших) є однією з важливих особливостей бактерій, що дозволяє бактеріальним спільнотам виживати та продукувати свої метаболіти за стресових умов. Zubair et al. (2019) встановили, що інокуляція пшениці холодостійкими штамми бактерій роду *Bacillus* сприяла індукції стресової реакції у рослин, що зазнали холодого стресу, через регулювання шляхів абсцизової кислоти, перекисного окислення ліпідів та накопичення проліну [24].

Зокрема, J. Dobrzyński та ін. (2025) дослідили вплив консорціуму PGPB, а саме *Pseudomonas* sp. G31 та *Azotobacter* sp. PBC2 (P1A), на ґрунтову бактеріальну спільноту пшениці в польових умовах. Порівняно з контролем встановлено значне збільшення вмісту нітратів та доступного фосфору у ризосфері впродовж вегетації, продуктивності рослин. Метааксономічне дослідження показало, що використаний консорціум не мав суттєвого впливу на різноманітність місцевих ґрунтових бактерій, однак, через 3 тижні після застосування, P1A збільшив відносну чисельність *Nitrospira*, що могло вплинути на збільшення нітратів у ризосфері [25].

За використання біопрепаратів на основі *Azospirillum brasilense*, *Bacillus subtilis*, *B. licheniformis*, *B. mucilaginosus* в агроценозі пшениці озимої підвищився вміст доступного фосфору та калію в ґрунті, збільшилась висота рослин, кількість зерен у колосі, врожайність культури. Результати аналізу PCoA показали, що склад мікробної спільноти більше корелював з різним періодом росту пшениці. Важливими чинниками,

що вплинули на структуру мікробної спільноти ґрунту були також рН, вміст Нітрогену, доступних фосфору, калію та органічної речовини [11]. Екзополісахариди (EPS) *Bacillus* spp. сприяють агрегації ґрунту, покращують процеси поглинання води та поживних речовин [26].

Висновки. Застосування біопрепаратів Граундфікс® та Азотохелп® на основі бактерій з поліфункціональними властивостями, внесених під передпосівну культивуацію, позитивно вплинуло на спрямованість мікробіологічних процесів, розвиток еколого-трофічних груп мікроорганізмів, а в подальшому на продуктивність культури.

Процеси мінералізації-імобілізації інтенсивніше відбуваються за дії активних штамів целюлозоруйнівних мікроорганізмів, кількість яких у варіантах з біопрепаратами зросла в 1,4–1,7 рази порівняно з контролем.

Встановлено адитивну та синергічну дію за сумісного використання біопрепаратів Граундфіксу® 1,5 л/га + Азотохелпу® 1,5 л/га під передпосівну культивуацію, порівняно з окремим внесенням біопрепаратів у нормі 3 л/га, що обумовило врівноваження процесів мінералізації та імобілізації у фазах цвітіння та дозрівання насіння, збільшення загальної кількості мікроорганізмів, чисельності бактерій роду *Azotobacter*, актиноміцетів, які є біоіндикаторами здоров'я ґрунту. Це забезпечило формування більш сприятливих умов для активного функціонування мікробіоти ризосфери пшениці озимої, збільшення доступних форм поживних речовин для рослин.

Навіть за екстремальних опадів у період вегетації 2021 р., метаболіти бактерій – складових біопрепаратів сприяли підвищенню біогенності ґрунту, опосередковано сприяли підвищенню стійкості рослин до несприятливих кліматичних умов, підвищенню продуктивності пшениці озимої в середньому в 1,2 рази порівняно з контролем.

Виявлено пролонговану позитивну дію за використання Граундфіксу® 1,5 л/га + Азотохелпу® 1,5 л/га у фазу ВВСН 87–89. Попри зменшення утворення корневих ексудатів у цей період, спостерігали стабільну чисельність азотфіксаторів, педотрофів, мікроорганізмів, які використовують сполуки органічного Нітрогену, спороутворювальних бактерій, що приводить до уповільнення біологічної виснаженості ґрунту після збирання врожаю, формування органо-мінерального балансу, створює передумови для кращої структури ґрунту та ефективної деструкції післяжнивних решток.

Перспективи. У сталому вирощуванні пшениці важливу роль відіграє склад мікробних ґрунтових консорціумів, еколого-трофічних груп бактерій, дослідження яких сприятиме більш ефективному вирощуванню зернових культур. Застосування поліфункціональних біопрепаратів Граундфіксу® та Азотохелпу®, здатних активізувати ґрунтову мікробіоту, а також всі біологічні процеси, що проходять у ґрунті, впливають на продуктивність в агроценозах пшениці озимої, є перспективним як елемент біологізації систем землеробства в умовах Західного Лісостепу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Rai N., Rai S.P., Sarma B.K. Prospects for abiotic stress tolerance in crops utilising phyto- and bio-stimulants. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2021. Vol. 5. 754853 p. DOI: 10.3389/fsufs.2021.754853.
2. Fadji A.E., Babalola O.O., Santoyo G., Perazzolli M. The potential role of microbial biostimulants in the amelioration of climate-change-associated abiotic stresses on crops. *Frontiers in Microbiology*. 2022. Vol. 12. 829099 p. DOI: 10.3389/fmicb.2021.829099.
3. Kumar S., Satyavir D., Sindhu S., Kumar R. Biofertilizers: an eco-friendly technology for nutrient recycling and environmental sustainability. *Current Research in Microbial Sciences*. 2021. Vol. 3. 100094 p. DOI: 10.1016/j.crmicr.2021.100094.
4. Bacterial biostimulants for climate-smart agriculture practices: mode of action, effect on plant growth and roadmap for commercial products / R. Singh et al. *Journal of Sustainable Agriculture and Environment*. 2024. Vol. 3. 12085 p. DOI: 10.1002/sae2.12085.
5. Comprehensive review of microbial inoculants: agricultural applications, technology trends in patents, and regulatory frameworks / G.A. dos Reis et al. *Sustainability*. 2024. Vol. 16. Issue 19. 8720 p. DOI: 10.3390/sul16198720.
6. Designing synergistic biostimulant formulations containing autochthonous phosphate-solubilising bacteria for sustainable wheat production / M. Yahya et al. *Frontiers in Microbiology*. 2022. Vol. 13. 889073 p. DOI: 10.3389/fmicb.2022.889073.
7. The role of biologicals Azotohelp®, Liposam®, and Organic-Balance® as mitigators of abiotic stress in maize plants / V. Bolokhovskiy et al. *Sustainable Soil and Water Management Practices for Agricultural Security*. IGI Global, 2024. P. 493–524. DOI: 10.4018/979-8-3693-8307-0.ch018.
8. Microbial inoculants in sustainable agriculture: advances, challenges, and future directions / A.M. Díaz-Rodríguez et al. *Plants*. 2025. Vol. 14. Issue 2. 191 p. DOI: 10.3390/plants14020191.
9. Yakovenko D.O., Boroday V.V., Bolokhovska V.A. Directionality of microbiological processes in the rhizosphere of winter wheat under the influence of biological products Azotohelp® and Groundfix®.

Modern Agronomy Trends: Innovation, Sustainable Development and the Future of Agriculture: monograph. Riga: Baltija Publishing, 2025. P. 434–458. DOI: 10.30525/978-9934-26-588-4-18.

10. Effects of seed-applied biofertilizers on rhizosphere biodiversity and growth of common wheat (*Triticum aestivum* L.) in the field / C. Dal Cortivo et al. *Frontiers in Plant Science*. 2020. Vol. 11. 72 p. DOI: 10.3389/fpls.2020.00072.

11. Effects of compound microbial fertilizer on soil characteristics and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) / W. Yang et al. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2020. Vol. 20. P. 2740–2748. DOI: 10.1007/s42729-020-00340-9.

12. Лихочвор В.В., Петриченко В.Ф., Івашук П.В., Корнійчук О.В. Рослинництво: технології вирощування сільськогосподарських культур. Львів: НВФ «Укр. технології», 2010. 1088 с.

13. Виробництво насіння пшениці озимої та ярої: методичні рекомендації / за ред. А.А. Сіроштан, В.П. Кавунця. Миронівка, 2021. 49 с.

14. ДСТУ 7847:2015. Якість ґрунту. Визначення чисельності мікроорганізмів у ґрунті методом посіву на тверде (агаризоване) живильне середовище. [Чинний від 2016.07.01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2015. 15 с.

15. Експериментальна ґрунтова мікробіологія: монографія / В.В. Волкогон та ін. Київ: Аграрна наука, 2010. 463 с.

16. Біологічні фактори оптимізації систем удобрення сільськогосподарських культур у сівозміні / В.В. Волкогон та ін. *Вісник сільськогосподарської науки*. 2021. Т. 99. Вип. 11. С. 33–41. DOI: 10.31073/agrovisnyk202111-04.

17. Токмакова Л., Трепач А. Мікробіологічна деструкція органічної речовини в агроценозах. *Вісник аграрної науки*. 2022. Т. 100. № 2. С. 19–26. DOI: 10.31073/agrovisnyk202202-03.

18. Функціонування мікробних ценозів ґрунту в умовах антропогенного навантаження / К.І. Андрєюк та ін. Київ: Обереги, 2001. 239 с.

19. Biostimulant activity of *Azotobacter chroococcum* and *Trichoderma harzianum* in durum wheat under water and nitrogen deficiency / S. Silletti et al. *Agronomy*. 2021. Vol. 11. Issue 2. 380 p. DOI: 10.3390/agronomy11020380.

20. Microbial consortium with nitrogen-fixing and mineral-solubilising attributes for growth of barley (*Hordeum vulgare* L.) / T. Kaur et al. *Heliyon*. 2022. Vol. 8. Issue 4. e09326. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e09326.

21. Use of biostimulants to improve drought tolerance in cereals / M. Anli et al. *Sustainable Remedies for Abiotic Stress in Cereals*. Singapore: Springer, 2022. DOI: 10.1007/978-981-19-5121-3_20.

22. Kozar F. Diazotroph activity regulating strategy under their introduction in agrocenosis. *Agricultural Microbiology*. 2021. Vol. 33. P. 33–43. DOI: 10.35868/1997-3004.33.33-43.

23. Tiwari S., Prasad V., Chauhan P.S., Lata C. *Bacillus amyloliquefaciens* confers tolerance to

various abiotic stresses and modulates plant response to phytohormones through osmoprotection and gene expression regulation in rice. *Frontiers in Plant Science*. 2017. Vol. 8. 1510 p. DOI: 10.3389/fpls.2017.01510.

24. Genetic screening and expression analysis of psychrophilic *Bacillus* spp. reveal their potential to alleviate cold stress and modulate phytohormones in wheat / M. Zubair et al. *Microorganisms*. 2019. Vol. 7. Issue 9. 337 p. DOI: 10.3390/microorganisms7090337.

25. Dobrzyński J., Kulkova I., Jakubowska Z., Wróbel B. Non-native PGPB consortium consisting of *Pseudomonas* sp. G31 and *Azotobacter* sp. PBC2 promoted winter wheat growth and slightly altered the native bacterial community. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. 3428 p. DOI: 10.1038/s41598-025-86820-3.

26. Agriculture in 2050: recalibrating targets for sustainable intensification / M.C. Hunter et al. *BioScience*. 2017. Vol. 67. Issue 4. P. 386–391. DOI: 10.1093/biosci/bix010.

REFERENCES

1. Rai, N., Rai, S.P., Sarma, B.K. (2021). Prospects for abiotic stress tolerance in crops utilising phyto- and bio-stimulants. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. Vol. 5, 754853 p. DOI: 10.3389/fufs.2021.754853.

2. Fadji, A.E., Babalola, O.O., Santoyo, G., Perazzolli, M. (2022). The potential role of microbial biostimulants in the amelioration of climate-change-associated abiotic stresses on crops. *Frontiers in Microbiology*. Vol. 12, 829099 p. DOI: 10.3389/fmicb.2021.829099.

3. Kumar, S., Satyavir, D., Sindhu, S., Kumar, R. (2021). Biofertilizers: An eco-friendly technology for nutrient recycling and environmental sustainability. *Current Research in Microbial Sciences*. Vol. 3, 100094 p. DOI: 10.1016/j.crmicr.2021.100094.

4. Singh, R., Kaur, S., Bhullar, S.S., Singh, H., Sharma, L.K. (2024). Bacterial biostimulants for climate-smart agriculture practices: Mode of action, effect on plant growth and roadmap for commercial products. *Journal of Sustainable Agriculture and Environment*. Vol. 3, 12085 p. DOI: 10.1002/sae2.12085.

5. dos Reis, G.A., Martínez-Burgos, W.J., Pozzan, R. (2024). Comprehensive review of microbial inoculants: Agricultural applications, technology trends in patents, and regulatory frameworks. *Sustainability*. Vol. 16, Issue 19, 8720 p. DOI: 10.3390/su16198720.

6. Yahya, M., Rasul, M., Sarwar, Y. (2022). Designing synergistic biostimulant formulations containing autochthonous phosphate-solubilising bacteria for sustainable wheat production. *Frontiers in Microbiology*. Vol. 13, 889073 p. DOI: 10.3389/fmicb.2022.889073.

7. Bolokhovskiy, V., Nagorna, O., Bolokhovska, V., Yakovenko, D., Boroday, V., Zelena, L., Likhonov, A., Bukhonska, Y. (2024). The role of

biologicals Azotohelp®, Liposam®, and Organic-Balance® as mitigators of abiotic stress in maize plants. *Sustainable Soil and Water Management Practices for Agricultural Security*. IGI Global. pp. 493–524. DOI: 10.4018/979-8-3693-8307-0.ch018.

8. Díaz-Rodríguez, A.M., Parra Cota, F.I., Cira Chávez, L.A. (2025). Microbial inoculants in sustainable agriculture: Advances, challenges, and future directions. *Plants*. Vol. 14, Issue 2, pp. 191. DOI: 10.3390/plants14020191.

9. Yakovenko, D.O., Boroday, V.V., Bolokhovska, V.A. (2025). Directionality of microbiological processes in the rhizosphere of winter wheat under the influence of biological products Azotohelp® and Groundfix®. In *Modern Agronomy Trends: Innovation, Sustainable Development and the Future of Agriculture*. Riga, Baltija Publishing, pp. 434–458. DOI: 10.30525/978-9934-26-588-4-18.

10. Dal Cortivo, C., Ferrari, M., Visioli, G. (2020). Effects of seed-applied biofertilizers on rhizosphere biodiversity and growth of common wheat (*Triticum aestivum* L.) in the field. *Frontiers in Plant Science*. Vol. 11, 72 p. DOI: 10.3389/fpls.2020.00072.

11. Yang, W., Gong, T., Wang, J. (2020). Effects of compound microbial fertilizer on soil characteristics and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. Vol. 20, pp. 2740–2748. DOI: 10.1007/s42729-020-00340-9.

12. Lykhochvor, V.V., Petrychenko, V.F., Ivashchuk, P.V., Kornichuk, O.V. (2010). Roslynnytstvo: tekhnolohii vyroshchuvannya silskohospodarskykh kultur [Crop production: Technologies of cultivation of agricultural crops]. Lviv, Ukrainian technologies, 1088 p.

13. Siroshstan, A.A., Kavunets, V.P. (2021). Vyrobnytstvo nasinnia pshenytsi ozymoi ta yaroï: metodychni rekomendatsii [Production of winter and spring wheat seed]. Myronivka, 49 p.

14. DSTU 7847:2015 (2015). Yakist gruntiv. Vyznachennia chyselnosti mikroorhanizmiv u grunti metodom posivu na tvrde (aharyzovane) zhyvylnne sere-dovyshche [Soil quality. Determination of number of microorganisms in soil by agar plate method]. Chynnyi vid 2016.07.01. [Effective from 2016.07.01]. Kyiv, DP «UkrNDNTs», 15 p.

15. Volkogon, V.V., Potapenko, L.V., Dimova, S.B. (2010). Eksperymentalna gruntova mikrobiolohiia [Experimental soil microbiology]. Kyiv, Agricultural science, 463 p.

16. Volkogon, V.V., Potapenko, L.V., Dimova, S.B., Volkogon, K.I., Khalep, Yu.M. (2021). Biolohichni factory optymizatsii system udobrennia silskohospodarskykh kultur u sivozmini [Biological factors of optimization of fertilization systems of crops in crop rotation]. *Visnyk silskohospodarskoi nauky* [Bulletin of Agricultural Science]. Vol. 99, Issue 11, pp. 33–41. DOI: 10.31073/agrovisnyk202111-04.

17. Tokmakova, L., Trepach, A. (2022). Mikrobiolohichna destruktsiia orhanichnoi rehovyny v ahrotsenozakh [Microbiological destruction of organic matter in agrocenoses]. *Visnyk ahrarynoi nauky* [Bulletin of Agricultural Science]. Vol. 100, Issue 2, pp. 19–26. DOI: 10.31073/agrovisnyk202202-03.

18. Andreiuk, K.I., Iutynska, H.O., Antypchuk, A.F. (2001). Funktsionuvannia mikrobnykh tsenoziv grunty v umovakh antropohennoho navantazhennia [Functioning of microbial communities of soil under anthropogenic pressure]. Kyiv, Oberehy, 239 p.

19. Silletti, S., Di Stasio, E., Van Oosten, M.J. (2021). Biostimulant activity of *Azotobacter chroococcum* and *Trichoderma harzianum* in durum wheat under water and nitrogen deficiency. *Agronomy*. Vol. 11, Issue 2, 380 p. DOI: 10.3390/agronomy11020380.

20. Kaur, T., Devi, R., Kumar, S. (2022). Microbial consortium with nitrogen-fixing and mineral-solubilising attributes for growth of barley (*Hordeum vulgare* L.). *Heliyon*. Vol. 8, Issue 4, e09326. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e09326.

21. Anli, M. (2022). Use of biostimulants to improve drought tolerance in cereals. *Sustainable Remedies for Abiotic Stress in Cereals*. Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-19-5121-3_20.

22. Kozar, F. (2021). Diazotroph activity regulating strategy under their introduction in agrocenosis. *Agricultural Microbiology*. Vol. 33, pp. 33–43. DOI: 10.35868/1997-3004.33.33-43.

23. Tiwari, S., Prasad, V., Chauhan, P.S., Lata, C. (2017). *Bacillus amyloliquefaciens* confers tolerance to various abiotic stresses and modulates plant response to phytohormones through osmoprotection and gene expression regulation in rice. *Frontiers in Plant Science*. Vol. 8, 1510 p. DOI: 10.3389/fpls.2017.01510.

24. Zubair, M., Hanif, A., Farzand, A. (2019). Genetic screening and expression analysis of psychrophilic *Bacillus* spp. reveal their potential to alleviate cold stress and modulate phytohormones in wheat. *Microorganisms*. Vol. 7, Issue 9, 337 p. DOI: 10.3390/microorganisms7090337.

25. Dobrzyński, J., Kulkova, I., Jakubowska, Z., Wróbel, B. (2025). Non-native PGPB consortium consisting of *Pseudomonas* sp. G31 and *Azotobacter* sp. PBC2 promoted winter wheat growth and slightly altered the native bacterial community. *Scientific Reports*. Vol. 15, 3428 p. DOI: 10.1038/s41598-025-86820-3.

26. Hunter, M.C., Smith, R.G., Schipanski, M.E., Atwood, L.W., Mortensen, D.A. (2017). Agriculture in 2050: Recalibrating targets for sustainable intensification. *BioScience*. Vol. 67, Issue 4, pp. 386–391. DOI: 10.1093/biosci/bix010.

The effect of Azotohelp® and Groundfix® biopreparations on the formation of microbial communities in the rhizosphere of winter wheat

Yakovenko D., Boroday V.

Recently, there has been growing interest worldwide in the use of biological multifunctional preparations for plant nutrition (biopreparations), which have a direct and indirect impact on soil fertility and play an active role in regulating the stability and productivity of grain crops in the context of climate change. During 2021–2022, under the conditions of the Khmelnytskyi State Agricultural Research Station of the Institute of Soil Science and Plant Cultivation of the

National Academy of Agrarian Sciences (Western Forest-Steppe of Ukraine), the effectiveness of applying Azotohelp® and Groundfix® biopreparations (biotechnology company BTU, Ukraine) before sowing cultivation on the dynamics of microbial communities in the rhizosphere of winter wheat was studied.

A significant influence of Groundfix and Azotohelp on the structure of ecological-trophic groups and the functional orientation of the microbial community in the winter wheat rhizosphere, and subsequently on crop productivity, was established. Under unfavorable conditions of crop vegetation in 2020-2021, the use of biopreparations contributed to the balance of processes and a stable level of available nutrients. Thus, the ratio of nitrifiers and ammonifiers during the flowering phase in the variants with Groundfix (3l/t) and Azotohelp (3 l/t) variants was 0.58 and 0.92, respectively, compared to the control (0.49).

The combined application of Groundfix® 1.5 l/ha + Azotohelp® 1.5 l/ha in 2022 during the flowering phase stimulated the development of microorganisms that use mineral forms of nitrogen and heterotrophic microorganisms that use organic nitrogen, their number was 3.8 and 5.8 times higher, respectively,

compared to the control variant. Also, the content of bacteria of the genus *Azotobacter* increased 3 times compared to the control (16.6 vs. 5.4 CFU/g of dry soil, respectively). At the same time, during the grain ripening phase, the number of these groups was at the control level, indicating a balance between mineralization and humification processes, microbiome development in the absence of excessive activation of destructive processes. The average yield increase over two years compared to the control was 0.58–0.94 t/ha.

A prolonged positive effect was observed when using Groundfix® 1.5 l/ha + Azotohelp® 1.5 l/ha in the BBCH 87–89 phase. Despite a decrease in root exudate formation during this period, a stable number of nitrogen fixers, pedotrophs, microorganisms that use organic nitrogen compounds, and spore-forming bacteria were observed, which leads to a slowdown in biological depletion of the soil after harvesting, the formation of an organo-mineral balance, and creates the conditions for better soil structure and effective destruction of post-harvest residues.

Keywords: *Triticum aestivum* L., ecological-trophic groups of microorganisms, plant rhizosphere, multifunctional biopreparations.



Copyright: Яковенко Д.О., Бородай В.В. © This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.



ORCID iD:

Яковенко Д.О.

Бородай В.В.

<https://orcid.org/0000-0008-8239-7684>

<https://orcid.org/0000-0002-8787-8646>