

УДК 633.854.78:631.53.01:631.461.5:631.5
DOI <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2026.38.10>

ФОРМУВАННЯ БІНАРНОЇ КОМПОЗИЦІЇ ДІАЗОТРОФІВ ТА ЇЇ ЗАСТОСУВАННЯ В АГРОЦЕНОЗІ СОНЯШНИКУ

ДУКА О.С. – аспірант

orcid.org/0009-0006-5138-2805

Інститут сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва
Національної академії аграрних наук України

КОЗАР С.Ф. – доктор сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник
orcid.org/0000-0003-1341-5603

Інститут сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва
Національної академії аграрних наук України,
Національний університет «Чернігівська політехніка»

ВОРОБЕЙ Ю.О. – кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник,
orcid.org/0000-0003-4505-6676

Інститут сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва
Національної академії аграрних наук України

ЛОГОША О.В. – доктор філософії з агрономії
orcid.org/0000-0002-4725-9381

Інститут сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва
Національної академії аграрних наук України
Національний університет «Чернігівська політехніка»

БІЛОКОНСЬКА О.М. – доктор філософії з агрономії
orcid.org/0000-0001-5080-7302

Інститут сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва
Національної академії аграрних наук України

Постановка проблеми. Соняшник (*Helianthus annuus* L.) належить до провідних олійних культур світового землеробства та має стратегічне значення для аграрного сектору України [8]. Упродовж тривалого періоду валові збори насіння у вітчизняному землеробстві нарощували переважно шляхом розширення посівних площ, що нерідко супроводжувалося порушенням науково обґрунтованого чергування культур у сівозмінах. Часте повернення соняшнику на попереднє місце вирощування підвищує навантаження на водні й поживні ресурси ґрунту та погіршує фітосанітарний стан агроценозу. За обмежених можливостей подальшого екстенсивного розширення посівів пріоритетного значення набувають елементи біологізації технології, зокрема застосування бактеріальних біоінокулянтів, спрямованих на підвищення продуктивності культури та зменшення залежності від агрохімічних ресурсів [20].

Важливим інструментом такої оптимізації є біологізація землеробства, зокрема застосування мікробних препаратів на основі ґрунтових азотфіксувальних мікроорганізмів, які відіграють ключову роль у процесах біологічної трансформації азоту в ґрунтах [1]. Інтродукція агрономічно корисних бактерій дає змогу оптимізувати живлення рослин і стимулювати їхній ріст. Проте результативність застосування біологічних засобів у відкритих агроecosистемах характеризується значною мінливістю. Ефективність інокулянтів залежить не лише від вихідних властивостей штамів, а й від їхньої сумісності

у полікомпонентних препаратах, оптимізації бактеріального навантаження, а також від сукупної дії абіотичних і технологічних факторів.

На приживання та функціонування інтродукованих мікроорганізмів впливають базові елементи технології, зокрема способи основного обробітку ґрунту та системи хімічного контролю бур'янів. Механічний обробіток змінює гідрофізичний режим і просторову організацію ґрунту [22], а також вертикальний розподіл мікробних угруповань [23]. Гербіциди можуть впливати на ґрунтову мікробіоту [21, 24], а також на біометричні показники і врожайність соняшнику [6]. Тому формування ефективної мікробної композиції вимагає комплексного підходу: від лабораторного добору біоагентів та обґрунтування їхнього співвідношення до оцінювання дії композиції на рослини й культивовані групи ризосферних мікроорганізмів у польових умовах за різних агротехнологічних фонів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Потенціал діазототрофів родів *Azotobacter* і *Azospirillum* як агентів біологізації рослинництва широко висвітлено в агрономічній літературі [9]. Вільноживучі бактерії роду *Azotobacter*, зокрема *A. chroococcum*, характеризуються аеробним метаболізмом, здатністю утворювати стійкі цисти, фіксувати атмосферний азот і продукувати фітогормони [9]. Коренеасоційовані азоспірили, зокрема *A. brasilense*, здатні взаємодіяти з рослиною та стимулювати морфогенез її кореневої системи завдяки синтезу індол-3-оцтової кислоти [12]. Сучасні дослідження також підтверджують



перспективність виділення й характеризування рістстимулювальних ризобактерій безпосередньо з ризосфери соняшнику для створення нових мікробних препаратів [14]. Відмінності функціональних стратегій цих бактерій створюють передумови для їхнього взаємодоповнення. Метааналітичні дослідження вказують на те, що мікробні консорціуми та бінарні композиції часто забезпечують кращий рістстимулювальний ефект порівняно з моноінокулянтами. Водночас перевага таких поєднань не є автоматичною: ефективність консорціумів залежить від властивостей і сумісності компонентів, а також від умов їх функціонування [17, 18].

У польових умовах структура мікробіоценозу ризосфери істотно залежить від ґрунтово-екологічних умов конкретного поля [19], що необхідно враховувати під час оцінювання ефективності інокулянтів. Системи основного обробітку ґрунту, зокрема традиційна оранка порівняно зі зменшеним обробітком, впливають на поровий простір, гідрофізичні властивості та розподіл поживних решток, модифікуючи умови розвитку аборигенної й інтродукованої мікробіоти [22, 23]. Додатковим фактором є система гербіцидного захисту. Гербіциди можуть впливати на ґрунтову біоту та її функціонування [21, 24]. Наприклад, залишки імідазолінових гербіцидів здатні модифікувати бактеріальні угруповання ризосфери залежно від фази розвитку рослин [11], а післясходове застосування окремих препаратів може спричиняти у гібридів соняшнику транзиторне пригнічення ростових процесів та інтенсивності фотосинтезу [10].

Раніше нами було встановлено вплив гербіцидних схем і способів основного обробітку ґрунту на потенційну азотфіксувальну активність ризосфери та врожайність соняшнику [4]. За післясходової гербіцидної схеми нижчі показники продуктивності спостерігали попри високі значення потенційної азотфіксувальної активності. Проте не було висвітлено формування бінарної композиції. Зокрема, не наведено результати первинного лабораторного й вегетаційного добору штамів, установлення робочого співвідношення компонентів і бактеріального навантаження за показниками проростання насіння, а також детального оцінювання впливу композиції на ранній розвиток проростків, біометричні показники рослин і чисельність культивованих еколого-трофічних груп мікроорганізмів ризосфери соняшнику за різних агротехнологічних фонів.

Мета статті. Обґрунтувати формування бінарної композиції діазотрофів на основі штамів *A. chroococcum* 2.1 та *A. brasilense* 137, а також оцінити дію композиції за показниками росту й розвитку соняшнику та чисельністю культивованих груп мікроорганізмів ризосфери за різних способів основного обробітку ґрунту і гербіцидних схем.

Матеріали та методика досліджень. Лабораторні та вегетаційні експерименти проводили на базі Інституту сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН. Польові дослідження закладали в умовах зони Полісся України на базі ТОВ «Деснянські зорі» (с. Ковчин Куликівської селищної територіальної громади Чернігівського району Чернігівської області) у 2021, 2024 та 2025 роках. У цій статті наведено результати польового досліджу за 2025 р., а раніше опубліковані дані

урожайності за цей рік [4] використано для їх зіставлення з біометричними та мікробіологічними показниками.

Об'єктом досліджень у польовому експерименті був високоолеїновий гібрид соняшнику CI Експерто, стійкий до гербіцидів технології Clearfield®. Для створення бінарної композиції діазотрофів використовували штами азотфіксувальних бактерій *A. chroococcum* та *A. brasilense* із робочої колекції лабораторії фізіології мікроорганізмів. Для порівняння з відомими штамми на першому етапі здійснювали лабораторний скринінг ізолятів із ризосферного ґрунту соняшнику. Ідентифікацію культур проводили за культурально-морфологічними ознаками згідно з визначником Берджі [13].

Для добору перспективної пари діазотрофів закладали вегетаційний дослід із 20 варіантами, що включав контроль (оброблення водою), 7 монокультур та 12 бінарних поєднань. Дослід проводили у вегетаційних посудинах об'ємом 7 л, які вміщували 5 кг дерново-підзолистого легкосуглинкового ґрунту з дослідної ділянки (рН 6,39; вміст гумусу 1,4 %). Зразки ризосферного ґрунту відбирали, а суху масу рослин визначали на початку бутонізації. Потенційну азотфіксувальну активність (ПАА) визначали ацетиленовим методом [5] на газовому хроматографі Chrom-4 із полум'яно-іонізаційним детектором після інкубації 3 г ґрунту у флаконах із модифікованим середовищем *Nfb* [4]. Дослід проводили у шести повтореннях.

Співвідношення компонентів і бактеріальне навантаження композиції оптимізували в лабораторних умовах шляхом порівняння досліджених варіантів. Насіння соняшнику пророщували в чашках Петрі у термостатах за постійної температури 20 °С. Енергію проростання визначали на 4-ту добу, а лабораторну схожість і довжину головного корінця – на 7-му добу згідно зі стандартом [2]. Суху масу проростків визначали ваговим методом після висушування до постійної маси. Критеріями вибору робочих параметрів композиції були максимальні середні значення зазначених показників.

Ґрунт дослідної ділянки дерново-підзолистий легкосуглинковий. Агрохімічна характеристика орного шару: вміст гумусу – 1,4 %; рН – 6,39; вміст загального азоту – 16,35 мг/кг ґрунту; рухомого фосфору за Кірсановим – 93,5 мг/кг ґрунту; обмінного калію за Масловою – 64,08 мг/кг ґрунту. Попередник – кукурудза. Сівбу проводили у травні з міжряддям 70 см і нормою висіву 62 тис. насінин/га. Польовий дослід закладали методом розщеплених ділянок. Площа облікової ділянки становила 360 м². Дослід проводили у чотирьох повтореннях.

Схема польового досліджу передбачала поєднання двох способів основного обробітку ґрунту (глибокого рихлення та оранки), двох гербіцидних схем (застосування досходових ґрунтових гербіцидів і післясходового гербіциду) та двох варіантів передпосівної бактеризації (без бактеризації та з бактеризацією бінарною композицією *A. chroococcum* 2.1 + *A. brasilense* 137), що формувало вісім варіантів досліджу. Передпосівну бактеризацію насіння здійснювали водними суспензіями штамів менш ніж за добу до сівби. Культури змішували у співвідношенні 1:1. Загальне бактеріальне навантаження композиції становило $1,28 \times 10^5$ колонієутворювальних одиниць (КУО) на насінину за розведення вихідної суспензії 1:10.

Глибоке рихлення проводили на глибину 38–40 см, оранку – до 28 см. Застосовували бакову суміш досходових ґрунтових гербіцидів (ДГГ): Сора-нет (1,8 л/га) і Перун (1,6 л/га), а також післясходовий гербіцид (ПГ) Каптора (1,0 л/га). Біометричні показники визначали за рослинами, відібраними з пробних снопів у чотирьох повтореннях; обліковували діаметр кошика, кількість листків і площу листової поверхні. Відповідність насіння встановленням технічним вимогам оцінювали за ДСТУ 7011:2009 [3], а натуру насіння визначали відповідно до «Методики державного сортопробування сільськогосподарських культур» [7].

Для мікробіологічних аналізів у фазі цвітіння соняшнику відбирали зразки ризосферного ґрунту [5]. Чисельність культивованих груп визначали методом серійних розведень і глибинного висіву ґрунтової суспензії: азотфіксувальні групи – на середовищах Ешбі та Доберейнер; мікроорганізми, що використовують органічні й мінеральні форми азоту, – на м'ясо-пептонному агарі (МПА) та крохмале-аміачному агарі (КАА) відповідно; мікроскопічні гриби – на середовищі Чапека [5].

Статистичну обробку експериментальних даних проводили із застосуванням загальноприйнятих методів планування та аналізу експериментів [15, 16]. Розраховували середні значення, стандартну похибку середнього, а для порівняння середніх значень урожайності обчислювали найменшу істотну різницю (HP_{05}).

Результати досліджень. На першому етапі провели первинний скринінг 53 ізолятів із ризосферного ґрунту соняшнику. Високий рівень нітрогеназної активності виявлено у 9,4 % культур; п'ять найактивніших ізолятів

відібрали для подальшого вивчення та порівняння з відомими активними штамми. У вегетаційному досліді оцінювали окремі штамми та їхні бінарні поєднання для добору перспективної композиції (табл. 1).

У варіантах із мікроорганізмами значення ПАА ризосферного ґрунту та сухої маси рослин були вищими, ніж у контролі. Найвищі середні значення обох показників серед досліджених варіантів отримано за застосування композиції *A. chroococcum* 2.1 + *A. brasilense* 137. Для цієї пари ПАА становила 46,7 нмоль C_2H_4 /(г сухого ґрунту·год), а суха маса рослин – 11,8 г/посудину, що відповідно на 108,5 % і 47,5 % перевищувало контрольні значення. Представники родів *Azotobacter* і *Azospirillum* відрізняються функціональними стратегіями [9, 12], що створює передумови для їхнього взаємодоповнення. Середні показники нововиділених ізолятів у вегетаційному досліді були нижчими, ніж у вибраного поєднання колекційних штамів. Тому композицію *A. chroococcum* 2.1 + *A. brasilense* 137 відібрали для наступного етапу досліджень.

Полікомпонентний склад сам по собі не гарантує переваги над моноінокуляцією, а надмірне бактеріальне навантаження може посилювати конкуренцію за субстрат або індукувати захисні реакції рослини [18]. Тому наступним етапом було встановлення робочого співвідношення штамів і бактеріального навантаження композиції за показниками проростання насіння. Серед досліджених варіантів найвищі середні значення лабораторної схожості (98 %), енергії проростання (97 %), довжини головного корінця (7,3 см) і сухої маси проростків (0,16 г) отримано за співвідношення *A. chroococcum* 2.1 та

Таблиця 1

Вплив діазотрофів на потенційну азотфіксувальну активність та суху масу рослин соняшнику у вегетаційному досліді

Варіант досліді	ПАА, нмоль C_2H_4 / г сухого ґрунту за годину	Суха маса рослин, г/посудину
Контроль, вода	22,4 ± 1,2	8,0 ± 0,4
<i>A. chroococcum</i> 2.1	30,1 ± 1,1	10,2 ± 0,6
<i>A. vinelandii</i> B221	31,2 ± 0,9	9,9 ± 0,9
<i>Azotobacter</i> sp. П14	29,5 ± 3,3	9,7 ± 1,7
<i>Azotobacter</i> sp. П31	24,9 ± 1,3	8,9 ± 0,8
<i>A. brasilense</i> B23	27,4 ± 2,3	9,0 ± 1,4
<i>A. brasilense</i> B102	32,8 ± 1,6	9,5 ± 0,6
<i>A. brasilense</i> 137	31,9 ± 1,2	10,1 ± 0,7
<i>A. chroococcum</i> 2.1 + <i>A. brasilense</i> B23	41,2 ± 1,0	11,2 ± 1,0
<i>A. chroococcum</i> 2.1 + <i>A. brasilense</i> B102	35,1 ± 2,1	10,9 ± 0,8
<i>A. chroococcum</i> 2.1 + <i>A. brasilense</i> 137	46,7 ± 3,0	11,8 ± 2,1
<i>A. vinelandii</i> B221 + <i>A. brasilense</i> B23	33,0 ± 1,0	10,3 ± 1,3
<i>A. vinelandii</i> B221 + <i>A. brasilense</i> B102	25,0 ± 0,7	10,4 ± 0,9
<i>A. vinelandii</i> B221 + <i>A. brasilense</i> 137	31,9 ± 0,8	10,3 ± 1,9
<i>Azotobacter</i> sp. П14 + <i>A. brasilense</i> B23	23,3 ± 2,2	8,2 ± 0,7
<i>Azotobacter</i> sp. П14 + <i>A. brasilense</i> B102	35,1 ± 1,2	10,8 ± 0,5
<i>Azotobacter</i> sp. П14 + <i>A. brasilense</i> 137	27,8 ± 0,6	9,7 ± 0,2
<i>Azotobacter</i> sp. П31 + <i>A. brasilense</i> B23	28,7 ± 1,3	8,9 ± 1,5
<i>Azotobacter</i> sp. П31 + <i>A. brasilense</i> B102	30,7 ± 1,2	9,3 ± 1,0
<i>Azotobacter</i> sp. П31 + <i>A. brasilense</i> 137	27,9 ± 1,9	10,5 ± 0,9

A. brasilense 137 як 1:1 і загального бактеріального навантаження $1,28 \times 10^5$ КУО/насінину. За інших досліджених співвідношень і навантажень середні значення цих показників були нижчими.

Виявлена реакція проростків узгоджується з відомою здатністю рістстимулювальних бактерій продукувати біологічно активні речовини, зокрема ауксини, гібереліни й цитокініни [9, 20]. Дію створеної композиції у відкритій агроecosистемі оцінювали за змінами культивованої мікробіоти ризосфери та показниками рослин на різних агротехнологічних фонах.

На всіх агротехнологічних фонах за бактеризації середні значення чисельності мікроорганізмів на середовищах Ешбі ($15,7\text{--}28,2 \times 10^6$ КУО/г ґрунту) та Доберейнер ($12,7\text{--}23,9 \times 10^6$ КУО/г ґрунту), а також частка обростання ґрунтових грудочок (93,3–100,0 %) були вищими, ніж у відповідних варіантах без бактеризації (табл. 2).

Оскільки використані поживні середовища є елективними, отримані результати вказують на вищі культуральні показники відповідних еколого-трофічних груп

мікробіоти, що цілком узгоджується з функціональним профілем інтродукованих бактерій.

Середні значення чисельності інших культивованих еколого-трофічних груп мікроорганізмів ризосфери також варіювали залежно від агротехнологічного фону (табл. 3).

Середні значення чисельності бактерій, що використовують органічні форми азоту на МПА та мінеральні форми азоту на КАА, варіювали залежно від способу обробітку ґрунту і гербіцидної схеми. Це узгоджується з даними про вплив обробітку ґрунту та гербіцидів на структуру ґрунтових мікробних угруповань [22–25]. На середовищі Чапека середні значення чисельності мікроскопічних грибів у всіх бактеризованих варіантах становили $3,6\text{--}5,5 \times 10^4$ КУО/г ґрунту порівняно з $1,3\text{--}2,9 \times 10^4$ КУО/г ґрунту без бактеризації. Такі зміни не слід однозначно трактувати як розвиток патогенної мікробіоти, проте можна припустити, що це є наслідком змін у складі та обсягах кореневих ексудатів стимульованих рослин, що формують нові трофічні ніші в ризосфері.

Таблиця 2

Культуральні показники діазотрофних груп у ризосферному ґрунті соняшнику за різних агротехнологічних фонів (фаза цвітіння), 2025 р.

Варіант досліджу	Чисельність на середовищі Ешбі, 10^6 КУО/г ґрунту	Обростання ґрунтових грудочок на середовищі Ешбі, %	Чисельність на середовищі Доберейнер, 10^6 КУО/г ґрунту
Без бактеризації			
Глибоке рихлення + ДГГ	$11,5 \pm 0,9$	$70,0 \pm 2,9$	$6,9 \pm 1,1$
Оранка + ДГГ	$7,7 \pm 1,7$	$56,7 \pm 3,3$	$10,3 \pm 0,2$
Глибоке рихлення + ПГ	$18,8 \pm 2,0$	$88,3 \pm 4,4$	$7,9 \pm 0,2$
Оранка + ПГ	$12,8 \pm 0,4$	$43,3 \pm 7,3$	$7,4 \pm 0,4$
Бактеризація <i>A. chroococcum</i> 2.1 + <i>A. brasilense</i> 137			
Глибоке рихлення + ДГГ	$25,5 \pm 4,9$	$100,0 \pm 0,0$	$12,7 \pm 2,8$
Оранка + ДГГ	$15,7 \pm 2,8$	$93,3 \pm 4,4$	$17,4 \pm 1,0$
Глибоке рихлення + ПГ	$28,2 \pm 2,7$	$100,0 \pm 0,0$	$23,9 \pm 4,7$
Оранка + ПГ	$25,8 \pm 5,0$	$98,3 \pm 1,6$	$19,8 \pm 2,2$

Таблиця 3

Чисельність культивованих мікроорганізмів, що використовують органічні й мінеральні форми азоту, та мікроскопічних грибів у ризосферному ґрунті соняшнику за різних агротехнологічних фонів (фаза цвітіння), 2025 р.

Варіант досліджу	Чисельність мікроорганізмів на МПА, 10^7 КУО/г ґрунту	Чисельність мікроорганізмів на КАА, 10^7 КУО/г ґрунту	Чисельність мікроскопічних грибів на середовищі Чапека, 10^4 КУО/г ґрунту
Без бактеризації			
Глибоке рихлення + ДГГ	$1,9 \pm 0,2$	$6,7 \pm 1,3$	$1,3 \pm 0,2$
Оранка + ДГГ	$8,5 \pm 1,1$	$11,3 \pm 0,7$	$2,9 \pm 0,8$
Глибоке рихлення + ПГ	$8,3 \pm 0,5$	$6,0 \pm 1,0$	$2,4 \pm 0,4$
Оранка + ПГ	$10,6 \pm 0,3$	$4,4 \pm 0,4$	$1,5 \pm 0,1$
Бактеризація <i>A. chroococcum</i> 2.1 + <i>A. brasilense</i> 137			
Глибоке рихлення + ДГГ	$11,0 \pm 0,5$	$4,4 \pm 1,7$	$3,6 \pm 0,4$
Оранка + ДГГ	$8,7 \pm 0,6$	$11,0 \pm 0,3$	$3,7 \pm 0,8$
Глибоке рихлення + ПГ	$8,5 \pm 0,5$	$9,6 \pm 0,7$	$5,5 \pm 0,7$
Оранка + ПГ	$10,4 \pm 1,1$	$10,3 \pm 0,4$	$4,5 \pm 0,9$

Варіанти досліду також відрізнялися за середніми біометричними показниками рослин і фізичними властивостями насіння (табл. 4). Для всіх наведених параметрів (діаметр кошика, кількість листків, площа листової поверхні та натура насіння) середні значення у бактеризованих варіантах були вищими, ніж у відповідних варіантах без бактеризації. Найвищі середні значення отримано за поєднання бактеризації, глибокого рихлення та досходових ґрунтових гербіцидів. Такий результат може бути пов'язаний із формуванням сприятливіших ґрунтово-фізичних умов за глибокого рихлення [22].

Передпосівна бактеризація підвищила урожайність на всіх агрофонах на 0,26–0,48 т/га, або на 13,8–24,1 %.

Найвищу урожайність 2,47 т/га та найбільший її приріст 0,48 т/га одержано за поєднання бактеризації з глибоким рихленням і досходовими ґрунтовими гербіцидами (рис. 1).

Нижчі середні біометричні показники та врожайність на агрофонах із післясходовим гербіцидом, попри високі культуральні показники діазотрофних груп, можуть бути пов'язані з комплексною дією системи захисту. За даними фізіологічних досліджень, застосування імідазолінонових препаратів по вегетації може спричиняти у гібридів соняшнику транзиторне пригнічення ростових процесів та інтенсивності фотосинтезу [10].

Отже, дія бінарної композиції у польових умовах варіювала залежно від поєднання способу основного

Таблиця 4

Біометричні показники та фізичні властивості насіння соняшнику за бактеризації, різних способів обробітку ґрунту та гербіцидних схем, 2025 р.

Варіант досліду	Діаметр кошика, см	Кількість листків, шт./росл.	Площа листової поверхні, см ² /росл.	Натура насіння, г/л
Без бактеризації				
Глибоке рихлення + ДГГ	25,2 ± 0,8	30,1 ± 1,2	6425,8 ± 210,4	395,4 ± 4,2
Оранка + ДГГ	24,6 ± 0,9	28,6 ± 1,1	6384,2 ± 198,6	391,2 ± 4,5
Глибоке рихлення + ПГ	23,4 ± 0,7	26,5 ± 1,0	6285,4 ± 185,2	386,5 ± 3,8
Оранка + ПГ	23,8 ± 0,8	27,2 ± 0,9	6338,5 ± 192,8	388,6 ± 4,1
Бактеризація <i>A. chroococcum</i> 2.1 + <i>A. brasilense</i> 137				
Глибоке рихлення + ДГГ	29,8 ± 1,1	32,5 ± 1,4	6845,2 ± 245,5	418,5 ± 5,1
Оранка + ДГГ	28,3 ± 1,0	31,4 ± 1,2	6612,8 ± 228,4	412,6 ± 4,8
Глибоке рихлення + ПГ	27,9 ± 0,9	30,8 ± 1,3	6580,4 ± 215,6	411,2 ± 4,5
Оранка + ПГ	26,8 ± 0,8	29,6 ± 1,1	6495,6 ± 205,2	408,4 ± 4,2

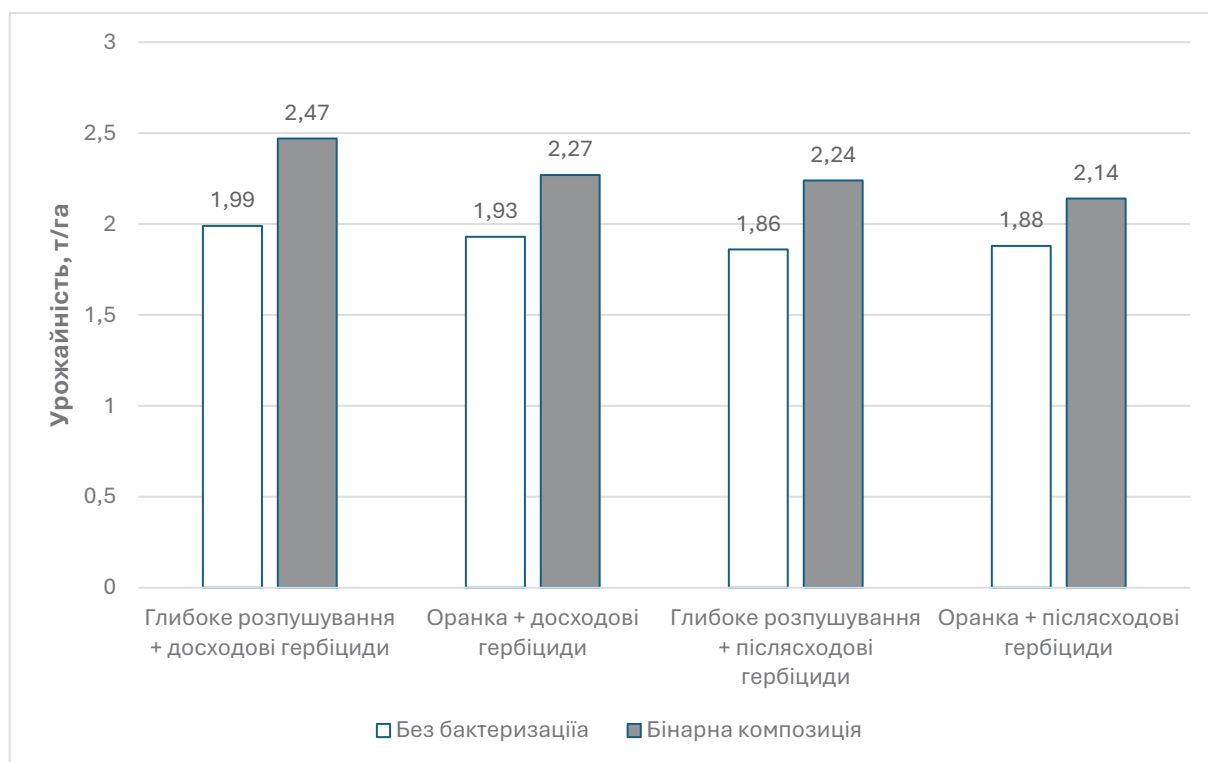


Рис. 1. Урожайність соняшнику залежно від агрофону та передпосівної бактеризації бінарною композицією *A. chroococcum* 2.1 + *A. brasilense* 137 у 2025 р. ($HIP_{05} = 0,12$ т/га)

обробітку ґрунту та гербіцидної схеми. За сукупністю середніх мікробіологічних і біометричних показників найбільш сприятливим серед досліджених було поєднання бактеризації з глибоким рихленням та досходовим гербіцидним захистом. Одержані дані дають підстави розглядати композицію *A. chroococcum* 2.1 + *A. brasilense* 137 як перспективний елемент біологізації технології вирощування соняшнику на дерново-підзолистому ґрунті Полісся.

Висновки. Серед досліджених окремих штамів і бінарних поєднань композиція *A. chroococcum* 2.1 + *A. brasilense* 137 забезпечувала найвищі середні значення потенційної азотфіксувальної активності – 46,7 нмоль C_2H_4 /(г сухого ґрунту·год), а також сухої маси рослин – 11,8 г/посудину.

У межах досліджених варіантів як робочі параметри композиції обрано співвідношення штамів 1:1 та загальне бактеріальне навантаження $1,28 \times 10^5$ КУО/насінину. За цих параметрів отримано найвищі середні значення лабораторної схожості, енергії проростання, довжини головного корінця і сухої маси проростків.

У фазі цвітіння соняшнику значення чисельності мікроорганізмів на середовищах Ешбі та Доберейнер, а також мікроскопічних грибів на середовищі Чапека у бактеризованих варіантах були вищими, ніж у відповідних варіантах без бактеризації. Чисельність мікроорганізмів, що використовують органічні й мінеральні форми азоту, варіювала залежно від агротехнологічного фону.

В умовах дерново-підзолистого легкосуглинкового ґрунту Полісся найвищі середні біометричні показники, зокрема площу листової поверхні 6845,2 см²/рослину та діаметр кошика 29,8 см, а також найвищі значення натурності насіння і врожайності отримано за поєднання бактеризації, глибокого рихлення та досходових ґрунтових гербіцидів.

Перспективи подальших досліджень полягають у вивченні впливу розробленої бінарної композиції на біохімічні показники якості насіння соняшнику, а також в оцінюванні її технологічної сумісності з біологічними препаратами фунгіцидної дії. Крім того, зважаючи на те, що отримані результати є специфічними для дерново-підзолистих ґрунтів зони Полісся, для широкого впровадження бінарної композиції в інших агрокліматичних зонах України доцільно провести додаткові випробування, що дозволить урахувати варіативність ґрунтово-кліматичних та агроєкологічних умов.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

- Волкогон В. В. Процеси біологічної трансформації азоту в ґрунтах (огляд літератури). *Сільськогосподарська мікробіологія*. 2026. Вип. 43. С. 3–32. DOI: 10.35868/1997-3004.43.3-32
- ДСТУ 4138-2002. Насіння сільськогосподарських культур. Методи визначання якості. [Чинний від 2004-01-01]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2003. 173 с.
- ДСТУ 7011:2009. Соняшник. Технічні умови. [Чинний від 2010-01-01]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2010. 11 с.
- Дука О. С., Козар С. Ф., Воробей Ю. О., Логоша О. В., Білоконська О. М. Ефективність бактеризації соняшнику діазотрофами за дії різних гербіцидів і способів обробітку ґрунту. *Сільськогосподарська мікробіологія*. 2025. Вип. 42. С. 72–82. DOI: 10.35868/1997-3004.42.72-82
- Експериментальна ґрунтова мікробіологія : монографія / за ред. В. В. Волкогона. Київ : Аграрна наука, 2010. 464 с. ISBN 978-966-540-300-5.
- Мазур С. О., Матусевич Г. Д. Вплив ґрунтових гербіцидів на біометричні показники та врожайність соняшнику. *Збалансоване природокористування*. 2023. № 1. С. 90–96. DOI: 10.33730/2310-4678.1.2023.278544
- Методика державного сорто випробування сільськогосподарських культур. Вип. 1. Загальна частина / за ред. В. В. Волкодава. Київ : Алефа, 2000. 100 с.
- Сидякіна О. В., Гамаюнова В. В. Сучасний стан та перспективи виробництва насіння соняшнику. *Таврійський науковий вісник*. 2023. № 131. С. 196–204. DOI: 10.32782/2226-0099.2023.131.25
- Nitrogen fixing *Azotobacter* species as potential soil biological enhancers for crop nutrition and yield stability / A. Aasfar et al. *Frontiers in Microbiology*. 2021. Vol. 12. Art. 628379. DOI: 10.3389/fmicb.2021.628379
- Photosynthetic performance of the imidazolinone resistant sunflower exposed to single and combined treatment by the herbicide imazamox and an amino acid extract / D. A. Balabanova et al. *Frontiers in Plant Science*. 2016. Vol. 7. Art. 1559. DOI: 10.3389/fpls.2016.01559
- The rhizosphere bacteriome is modified by wheat genotype and growth stage under increased imidazolinone herbicide residues / B. B. Dzoma et al. *Biology and Fertility of Soils*. 2025. Vol. 61. P. 717–733. DOI: 10.1007/s00374-025-01890-9
- Fukami J., Cerezini P., Hungria M. *Azospirillum*: benefits that go far beyond biological nitrogen fixation. *AMB Express*. 2018. Vol. 8. Art. 73. DOI: 10.1186/s13568-018-0608-1
- Bergey's Manual of Systematic Bacteriology* / G. M. Garrity et al. 2nd ed. Vol. 2, Part B: The Gammaproteobacteria; Part C: The Alpha-, Beta-, Delta-, and Epsilonproteobacteria. New York : Springer, 2005. DOI: 10.1007/0-387-28022-7; 10.1007/0-387-29298-5
- Güler M., Ögütçü H. Isolation and characterization of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) from rhizosphere of *Helianthus annuus* L. *International Journal of Agriculture, Environment and Food Sciences*. 2024. Vol. 8, № 2. P. 412–429. DOI: 10.31015/iaefs.2024.2.16
- Hinkelmann K., Kempthorne O. *Design and Analysis of Experiments*. Vol. 2: Advanced Experimental Design. 1st ed. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2005. 780 p. DOI: 10.1002/0471709948
- Hinkelmann K., Kempthorne O. *Design and Analysis of Experiments*. Vol. 1: Introduction to Experimental Design. 2nd ed. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2008. 631 p. DOI: 10.1002/9780470191750
- Liu X., Mei S., Falcão Salles J. Inoculated microbial consortia perform better than single strains in living soil: A meta-analysis. *Applied Soil Ecology*. 2023. Vol. 190. Art. 105011. DOI: 10.1016/j.apsoil.2023.105011
- Menéndez E., Paço A. Is the application of plant probiotic bacterial consortia always beneficial for plants? Exploring synergies between rhizobial and non-rhizobial bacteria and their effects on agro-economically valuable crops. *Life*. 2020. Vol. 10, № 3. Art. 24. DOI: 10.3390/life10030024

19. Nwachukwu B. C., Ayangbenro A. S., Babalola O. O. Comparative study of microbial structure and functional profile of sunflower rhizosphere grown in two fields. *BMC Microbiology*. 2021. Vol. 21. Art. 337. DOI: 10.1186/s12866-021-02397-7
 20. Plant growth-promoting bacteria as bioinoculants: Attributes and challenges for sustainable crop improvement / M. del C. Orozco-Mosqueda et al. *Agronomy*. 2021. Vol. 11, № 6. Art. 1167. DOI: 10.3390/agronomy11061167
 21. Impact of herbicides on soil biology and function / M. T. Rose et al. *Advances in Agronomy*. 2016. Vol. 136. P. 133–220. DOI: 10.1016/bs.agron.2015.11.005
 22. Schlüter S., Großmann C., Diel J., Wu G.-M., Tischler S., Deubel A., Rücknagel J. Long-term effects of conventional and reduced tillage on soil structure, soil ecological and soil hydraulic properties. *Geoderma*. 2018. Vol. 332. P. 10–19. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.07.001
 23. Sun R., Li W., Dong W., Tian Y., Hu C., Liu B. Tillage changes vertical distribution of soil bacterial and fungal communities. *Frontiers in Microbiology*. 2018. Vol. 9. Art. 699. DOI: 10.3389/fmicb.2018.00699
 24. Thiour-Mauprivez C., Martin-Laurent F., Calvayrac C., Barthelmebs L. Effects of herbicide on non-target microorganisms: towards a new class of biomarkers? *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 684. P. 314–325. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.230
 25. Wang H., Ren W., Xu Y., Wang X., Ma J., Sun Y., Hu W., Chen S., Dai S., Song J., Jia J., Teng Y. Long-term herbicide residues affect soil multifunctionality and the soil microbial community. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2024. Vol. 283. Art. 116783. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2024.116783
- REFERENCES:**
1. Volkohon, V.V. (2026). Protsesty biolohichnoi transformatsii azotu v gruntakh (ohliad literatury) [Processes of biological transformation of nitrogen in soils (literature review)]. *Silskohospodarska mikrobiologhiia*, 43, 3–32. <https://doi.org/10.35868/1997-3004.43.3-32> [in Ukrainian].
 2. DSTU 4138-2002. (2003). *Nasinnia silskohospodarskykh kultur. Metody vyznachannia yakosti* [Seeds of agricultural crops. Methods for determining quality]. [Chynnyi vid 2004-01-01]. Vyd. ofits. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 173 p. [in Ukrainian].
 3. DSTU 7011:2009. (2010). *Soniashnyk. Tekhnichni umovy* [Sunflower. Specifications]. [Chynnyi vid 2010-01-01]. Vyd. ofits. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 11 p. [in Ukrainian].
 4. Duka, O.S., Kozar, S.F., Vorobei, Yu.O., Lohosha, O.V., & Bilokonska, O.M. (2025). Efektyvnist bakteryzatsii soniashnyku diazotrofamy za dii riznykh herbitsydiv i sposobiv obrobittu gruntu [Effectiveness of sunflower bacterization with diazotrophs under different herbicides and tillage methods]. *Silskohospodarska mikrobiologhiia*, 42, 72–82. <https://doi.org/10.35868/1997-3004.42.72-82> [in Ukrainian].
 5. Volkohon, V.V. (Ed.). (2010). *Eksperymentalna gruntova mikrobiologhiia: monohrafiia* [Experimental soil microbiology: a monograph]. Kyiv: Ahrarna nauka, 464 p. [in Ukrainian].
 6. Mazur, S.O., & Matusevych, H.D. (2023). Vplyv gruntovykh herbitsydiv na biometrychni pokaznyky ta vrozhaunist soniashnyku [Influence of soil herbicides on biometric parameters and sunflower yield]. *Zbalansovane pryrodokorystuvannia*, 1, 90–96. <https://doi.org/10.33730/2310-4678.1.2023.278544> [in Ukrainian].
 7. Volkodav, V.V. (Ed.). (2000). *Metodyka derzhavnoho sortovyprovuvannia silskohospodarskykh kultur. Vyp. 1. Zahalna chastyna* [Methodology of state variety testing of agricultural crops. Issue 1. General part]. Kyiv: Alefa, 100 p. [in Ukrainian].
 8. Sydiakina, O.V., & Hamaiunova, V.V. (2023). Suchasnyi stan ta perspektyvy vyrobnytstva nasinnia soniashnyku [Current state and prospects for sunflower seed production]. *Tavriskyi naukovyi visnyk*, 131, 196–204. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2023.131.25> [in Ukrainian].
 9. Aasfar, A., Bargaz, A., Yaakoubi, K., Hilali, A., Bennis, I., Zeroual, Y., & Meftah Kadmiri, I. (2021). Nitrogen fixing *Azotobacter* species as potential soil biological enhancers for crop nutrition and yield stability. *Frontiers in Microbiology*, 12, 628379. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.628379>
 10. Balabanova, D. A., Paunov, M., Goltsev, V., Cuypers, A., Vangronsveld, J., & Vassilev, A. (2016). Photosynthetic performance of the imidazolinone resistant sunflower exposed to single and combined treatment by the herbicide imazamox and an amino acid extract. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1559. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01559>
 11. Dzoma, B. B., Zhou, Y., Wilhelm, N., & Denton, M. (2025). The rhizosphere bacteriome is modified by wheat genotype and growth stage under increased imidazolinone herbicide residues. *Biology and Fertility of Soils*, 61, 717–733. <https://doi.org/10.1007/s00374-025-01890-9>
 12. Fukami, J., Cerezini, P., & Hungria, M. (2018). *Azospirillum*: benefits that go far beyond biological nitrogen fixation. *AMB Express*, 8, 73. <https://doi.org/10.1186/s13568-018-0608-1>
 13. Garrity, G. M., Brenner, D. J., Krieg, N. R., & Staley, J. T. (Eds.). (2005). *Bergey's manual of systematic bacteriology* (2nd ed., Vol. 2, Parts B–C). Springer. <https://doi.org/10.1007/0-387-28022-7> (Part B); <https://doi.org/10.1007/0-387-29298-5> (Part C).
 14. Güler, M., & Ögütcü, H. (2024). Isolation and characterization of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) from rhizosphere of *Helianthus annuus* L. *International Journal of Agriculture, Environment and Food Sciences*, 8(2), 412–429. <https://doi.org/10.31015/iaefs.2024.2.16>
 15. Hinkelmann, K., & Kempthorne, O. (2005). *Design and analysis of experiments: Volume 2. Advanced experimental design*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/0471709948>
 16. Hinkelmann, K., & Kempthorne, O. (2008). *Design and analysis of experiments: Volume 1. Introduction to experimental design* (2nd ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470191750>
 17. Liu, X., Mei, S., & Falcão Salles, J. (2023). Inoculated microbial consortia perform better than single strains in living soil: A meta-analysis. *Applied Soil Ecology*, 190, 105011. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105011>
 18. Menéndez, E., & Paço, A. (2020). Is the application of plant probiotic bacterial consortia always beneficial for plants? Exploring synergies between rhizobial and non-rhizobial bacteria and their effects on agro-economically valuable crops. *Life*, 10(3), 24. <https://doi.org/10.3390/life10030024>
 19. Nwachukwu, B. C., Ayangbenro, A. S., & Babalola, O. O. (2021). Comparative study of microbial structure and

- functional profile of sunflower rhizosphere grown in two fields. *BMC Microbiology*, 21, 337. <https://doi.org/10.1186/s12866-021-02397-7>
20. Orozco-Mosqueda, M. del C., Flores, A., Rojas-Sánchez, B., Urtis-Flores, C. A., Morales-Cedeño, L. R., Valencia-Marin, M. F., Chávez-Avila, S., Rojas-Solis, D., & Santoyo, G. (2021). Plant growth-promoting bacteria as bioinoculants: Attributes and challenges for sustainable crop improvement. *Agronomy*, 11(6), 1167. <https://doi.org/10.3390/agronomy11061167>
 21. Rose, M. T., Cavagnaro, T. R., Scanlan, C. A., Rose, T. J., Vancov, T., Kimber, S., Kennedy, I. R., Kookana, R. S., & Van Zwielen, L. (2016). Impact of herbicides on soil biology and function. *Advances in Agronomy*, 136, 133–220. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.11.005>
 22. Schlüter, S., Großmann, C., Diel, J., Wu, G.-M., Tischer, S., Deubel, A., & Rücknagel, J. (2018). Long-term effects of conventional and reduced tillage on soil structure, soil ecological and soil hydraulic properties. *Geoderma*, 332, 10–19. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.001>
 23. Sun, R., Li, W., Dong, W., Tian, Y., Hu, C., & Liu, B. (2018). Tillage changes vertical distribution of soil bacterial and fungal communities. *Frontiers in Microbiology*, 9, 699. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00699>
 24. Thiour-Mauprivez, C., Martin-Laurent, F., Calvayrac, C., & Barthelmebs, L. (2019). Effects of herbicide on non-target microorganisms: Towards a new class of biomarkers? *Science of the Total Environment*, 684, 314–325. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.230>
 25. Wang, H., Ren, W., Xu, Y., Wang, X., Ma, J., Sun, Y., Hu, W., Chen, S., Dai, S., Song, J., Jia, J., & Teng, Y. (2024). Long-term herbicide residues affect soil multifunctionality and the soil microbial community. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 283, 116783. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116783>

Дука О.С., Козар С.Ф., Воробей Ю.О., Логоша О.В., Білоконська О.М. Формування бінарної композиції діазотрофів та її застосування в агроценозі соняшнику

Мета. Обґрунтувати формування бінарної композиції на основі штамів *Azotobacter chroococcum* 2.1 та *Azospirillum brasilense* 137, а також оцінити ефективність її дії за впливом на рослини соняшнику та чисельністю культивованих груп мікроорганізмів ризосфери за різних агроприймів. **Методи.** Дослідження проведено в умовах Полісся України на дерново-підзолистому легкосуглинковому ґрунті. Використано методи: мікробіологічні (виділення ізолятів, визначення титру клітин, культивування на елективних середовищах), газохроматографічний (визначення потенційної азотфіксувальної активності), польовий, біометричний, статистичний. **Результати.** У вегетаційному досліді серед двадцяти варіантів найвищі показники потенційної азотфіксувальної активності та накопичення сухої маси забезпечило поєднання штамів *A. chroococcum* 2.1 і *A. brasilense* 137. Встановлено, що максимум лабораторної схожості, енергії проростання, довжини корінця та сухої маси проростків досягається за співвідношення компонентів 1:1. У фазі цвітіння виявлено

вищі середні показники чисельності мікроорганізмів на середовищах Ешбі та Доберейнер порівняно з неінюкульованими контролюми, тоді як реакція інших еколого-трофічних груп залежала від застосованої агротехніки. Біометричні показники рослин і фізичні властивості насіння були найвищими за умови поєднання бактерізації, глибокого рихлення та досходових ґрунтових гербіцидів. **Висновки.** Одержані дані свідчать про перспективність композиції діазотрофів як елемента екологічно збалансованої технології вирощування соняшнику на дерново-підзолистих ґрунтах зони Полісся. Найкращі умови для реалізації біологічного потенціалу інтродукованих діазотрофів формуються за глибокого безполіцевого рихлення та меншого безпосереднього навантаження на вегетуючі рослини порівняно з післясходовою схемою.

Ключові слова: *Azotobacter chroococcum*, *Azospirillum brasilense*, передпосівна інюкуляція насіння, способи обробітку ґрунту, хімічний контроль бур'янів, культивована мікробіота.

Duka O.S., Kozar S.F., Vorobei Yu.O., Lohosha O.V., Bilokonska O.M. Formation of a binary diazotroph composition and its application in a sunflower agrocenosis

Purpose. To substantiate the formation of a binary composition based on *Azotobacter chroococcum* 2.1 and *Azospirillum brasilense* 137 strains and to evaluate its effectiveness based on its effects on sunflower plants and the abundance of culturable groups of rhizosphere microorganisms under different agricultural practices. **Methods.** The research was conducted in the Ukrainian Polissia on sod-podzolic light loamy soil. The following methods were used: microbiological (isolation of isolates, determination of cell titer, cultivation on selective media), gas-chromatographic (determination of potential nitrogen-fixing activity), field, biometric, and statistical. **Results.** In the pot experiment, among twenty variants, the combination of *A. chroococcum* 2.1 and *A. brasilense* 137 strains provided the best average indicators of potential nitrogen-fixing activity and dry mass accumulation. It was established that the highest laboratory germination, germination energy, radicle length, and seedling dry mass were achieved at a component ratio of 1:1. During the flowering stage, the mean abundance of microorganisms cultured on Ashby and Döbereiner media was higher than in the uninoculated controls, whereas the response of other ecological-trophic groups depended on the agricultural practices applied. The biometric parameters of the plants and the physical properties of the seeds were highest under the combination of inoculation, deep loosening, and pre-emergence soil herbicides. **Conclusions.** The obtained data indicate that the diazotroph composition is a promising element of an ecologically balanced sunflower cultivation technology on sod-podzolic soils in the Polissia zone. The most favorable conditions for realizing the biological potential of the introduced diazotrophs were created by deep non-inversion tillage and lower direct herbicide exposure of growing plants compared with the post-emergence herbicide application scheme.

Key words: *Azotobacter chroococcum*, *Azospirillum brasilense*, pre-sowing seed inoculation, soil tillage methods, chemical weed control, culturable microbiota.

Дата першого надходження статті до видання: 27.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 21.10.2026