

ЕФЕКТИВНІСТЬ БАКТЕРИЗАЦІЇ СОНЯШНИКУ ДІАЗОТРОФАМИ ЗА ДІЇ РІЗНИХ ГЕРБІЦИДІВ І СПОСОБІВ ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ

О. С. Дука¹, <https://orcid.org/0009-0006-5138-2805>,

С. Ф. Козар^{1,2}, <https://orcid.org/0000-0003-1341-5603>,

Ю. О. Воробей¹, <https://orcid.org/0000-0003-4505-6676>,

О. В. Логоша^{1,2}, <https://orcid.org/0000-0002-4725-9381>,

О. М. Білоконська¹, <https://orcid.org/0000-0001-5080-7302>

¹Інститут сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН
вул. Шевченка, 97; м. Чернігів, 14030, Україна

²Національний університет «Чернігівська політехніка»
вул. Шевченка, 95; м. Чернігів, 14030, Україна
e-mail: kozarsf@gmail.com

Мета. Встановити вплив гербіцидів різних хімічних груп і способів основного обробітку ґрунту на функціональну активність азотфіксувальних бактерій *Azotobacter chroococcum* 2.1 і *Azospirillum brasilense* 137 та їхню ефективність при вирощуванні соняшнику в умовах Полісся України. **Методи.** Польові дослідження проведені у Чернігівській області на дерново-підзолистому легкосуглинковому ґрунті. Схема дослідів передбачала два способи основного обробітку ґрунту (оранка і глибоке рихлення), а також два варіанти застосування гербіцидів (досходові: Сора-нет 1,8 л/га (пропізохлор) + Перун 1,6 л/га (прометрин); післясходові: Каптора 1,0 л/га (імазамокс + імазаніпр)). Насіння соняшнику гібриду СІ Експерто обробляли діазотрофами *A. chroococcum* 2.1 та *A. brasilense* 137. Азотфіксувальну активність діазотрофів визначали ацетиленовим методом. **Результати.** Встановлено, що глибоке рихлення ґрунту забезпечує кращу польову схожість у порівнянні з оранкою. Зафіксовано диференційований вплив гербіцидів на азотфіксацію: застосування післясходових препаратів забезпечує вищу нітрогеназну активність у фазі цвітіння, ніж використання досходових ґрунтових. Водночас виявлено, що незважаючи на вищу азотфіксувальну активність, варіанти з післясходовими гербіцидами продемонстрували нижчу продуктивність соняшнику. Відсутність залежності між високою активністю азотфіксації та врожайністю може свідчити про фітотоксичний вплив післясходових гербіцидів на рослину, що нівелює переваги азотфіксації. Найвища середня за три роки врожайність культури отримана у варіанті з бактеризацією, глибоким рихленням і досходовими гербіцидами — 3,09 т/га, що на 18,8% перевищує контрольний показник. **Висновки.** Продуктивність соняшнику лімітується фітотоксичним впливом післясходових гербіцидів на рослину-господаря. Оптимальною технологічною моделлю визначено поєднання глибокого рихлення ґрунту, застосування досходових ґрунтових гербіцидів і передпосівної інокуляції насіння діазотрофами *A. chroococcum* 2.1 і *A. brasilense* 137. Такий комплексний підхід забезпечує мінімізацію хімічного стресу в критичні фази розвитку рослин, що сприяє реалізації біологічного потенціалу культури.

Ключові слова: діазотрофи, гербіциди, глибоке рихлення, оранка, соняшник, урожайність.

Вступ. Соняшник (*Helianthus annuus* L.) є важливою та високорентабельною експортно орієнтованою культурою для аграрного сектору України. В останні десятиліття спостерігається інтенсифікація його вирощування, що привело до розширення посівних площ до понад 6 млн га [1]. Таке нарощування обсягів виробництва сформувало ситуацію, яка характеризується підвищеним антропогенним навантаженням, ризиками виснаження ґрунтів і погіршенням фітосанітарного стану агроценозів.

На фоні прогресуючої деградації родючості певної частини ґрунтів і постійного зростання вартості енергоресурсів збільшується залежність сучасних агротехнологій вирощування соняшнику від мінеральних добрив. Економічна необхідність зниження собівартості продукції, а також екологічні ризики, пов'язані із забрудненням довкілля та потребою у збереженні родючості ґрунтів, зумовлюють необхідність пошуку альтернативних, екологічно безпечних методів живлення рослин [2; 3].

У цьому контексті інтерес до біологічних методів підтримки продуктивності агроценозів соняшнику набуває важливого значення. Використання мікробних препаратів на основі ефективних штамів азотфіксувальних бактерій варто розглядати не як альтернативу мінеральному азоту, а як важливий компонент інтегрованих технологій, що здійснює комплексний вплив на фізіологічний стан рослин і функціонування ризосфери. Діазотрофи, зокрема представники родів *Azotobacter* та *Azospirillum*, здатні перетворювати атмосферний азот у доступні для рослин форми, але їхня роль є комплексною та охоплює також синтез фітогормонів, покращення розвитку кореневої системи й оптимізацію біологічних процесів у ризосфері [3]. Проте функціональна активність цих мікроорганізмів не є стабільною. Вона істотно варіюється залежно від фізико-хімічних властивостей ґрунту, які трансформуються під впливом агротехнологічних прийомів (обробітку ґрунту, застосування гербіцидів) [4], а також детермінується біологічними особливостями рослини-господаря. Необхідно враховувати, що соняшник формує специфічний склад ризосфери, що додатково впливає на розвиток мікробних асоціацій [5]. Тому в реальних агроценозах реалізація біологічно-

го потенціалу діазотрофів лімітується комплексною дією антропогенних і біотичних факторів.

Отже, дослідження впливу агротехнологічних чинників на активність інтродукованих азотфіксувальних бактерій має важливе значення для розробки ефективних технологій вирощування соняшнику.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз публікацій показує, що в Україні мікробні препарати активно досліджуються та впроваджуються у системах сталого сільськогосподарства [6; 7]. Зокрема, їх використовують для підвищення продуктивності соняшнику [8; 9], водночас ефект інокуляції у польових умовах розглядається не як альтернатива мінеральному азоту, а як комплексний біостимулювальний вплив на рослину й ризосферу.

Проте ефективність використання біопрепаратів на основі діазотрофів у сучасних агротехнологіях може обмежуватися впливом окремих технологічних заходів, у т. ч. способів обробітку ґрунту й застосуванням гербіцидів [4; 10].

Опубліковані дослідження підтверджують прямий зв'язок активності мікроорганізмів із різними системами обробітку [11–14]. З одного боку, технології консерваційного обробітку ґрунту, накопичуючи органічні рештки у верхньому шарі ґрунту, створюють сприятливе енергетичне середовище для діазотрофів, які потребують великої кількості вуглецю для енергозатратного процесу азотфіксації. З іншого, ці ж технології можуть за певних умов створювати несприятливе для бактерій середовище, що формується за рахунок підвищення кислотності ґрунту, що негативно впливає на функціональну активність діазотрофів і може змінювати їхній внесок у біологічні процеси ризосфери [15]. Крім того, такі умови часто сприяють домінуванню грибів над бактеріями [16], що посилює біологічну конкуренцію при застосуванні бактеріальних інокулянтів [17].

Інший, більш критичний, фактор впливу на діазотрофи — гербіциди, які є невід'ємною частиною сучасних технологій вирощування сільськогосподарських культур. Дослідження *in vitro* [4] доводять пряму цитотоксичність цих пестицидів для азотобактера. Вплив гербіцидів передбачає не лише пригнічення росту, але й поверхневі

морфологічні пошкодження (розриви, дезорганізацію клітин) і пошкодження клітинної мембрани. Пестициди здатні інгібувати синтез бактеріями індоліл-3-оцтової кислоти. Це означає, що гербіцид може не знищити бактерію, а позбавити її здатності стимулювати ріст рослини-господаря [4], що зменшує потенціал мікроорганізмів як фітобіостимуляторів. За даними Mertens et al. [18], деякі гербіциди, включно з гліфосатом, можуть утворювати стабільні комплекси з мікроелементами, що потенційно змінює їхню біодоступність у ґрунтовому середовищі. Такі зміни можуть впливати на металозалежні мікробні процеси, у тому числі й на активність нітрогенази.

Окрему проблему становить вплив гербіцидів на саму рослину. Наприклад, за дії гербіцидів у рослини-господаря порушується синтез амінокислот, а також послаблюється асоціативний зв'язок із мікроорганізмами через інгібування ацетолактатсинтази [19], що унеможливорює ефективну взаємодію з діазотрофами. Це особливо актуально для гербіцидів, що використовуються при вирощуванні сояшнику. Деякі публікації підтверджують, що застосування імідазолінонів (імазамокс, імазапір) в технологіях Clearfield® може провокувати у гібридів сояшнику тимчасове пожовтіння (хлороз) і затримку росту [19]. Цей фітотоксичний ефект, хоч і тимчасовий, значно посилюється, коли рослина вже перебуває в умовах стресу (посуха, спека) [20] або на ґрунтах з підвищеною кислотністю та ущільненням [21]. За таких обставин фітотоксичний вплив здатен суттєво зменшувати ефективність взаємодії рослини з інтродукованими бактеріями.

Отже, бактерії, які є основою інокулянта, стикаються з комплексним стресом [4; 19; 22]: фізичним (від обробітку ґрунту), прямим хімічним (цитотоксичність гербіциду) і непрямим хімічним (фітотоксичність на рослину-господаря). Це пояснює, чому ефективність біопрепаратів у польових умовах визначається не лише потенціалом азотфіксації, а сукупною взаємодією рослини, мікроорганізмів і агротехнологічних чинників. Саме тому необхідними є польові дослідження, які моделюють різні агротехнологічні сценарії та дозволяють оцінити реальну ефективність інтродукції діазотрофів за різних умов вирощування сояшнику.

Матеріали та методи досліджень. Польові дослідження проводили в 2021, 2024 та 2025 роках у Куликівському районі Чернігівської області в господарстві ТОВ «Деснянські зорі» (зона Полісся України). Ґрунт дослідної ділянки — дерново-підзолистий легкосуглинковий. Агрохімічна характеристика орного шару: вміст гумусу — 1,4 %; $pH_{вод.}$ — 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.

Дослід — польовий, закладений методом розщеплених ділянок у чотириразовій повторності. Площа облікової ділянки — 360 м². Попередник — кукурудза.

Схему досліду наведено нижче.

Блок 1. Без бактеризації:

- 1) глибоке рихлення + досходові ґрунтові гербіциди (ДГГ);
- 2) оранка + ДГГ;
- 3) глибоке рихлення + післясходові гербіциди (ПГ);
- 4) оранка + ПГ.

Блок 2. Бактеризація *A. chroococcum* 2.1 + *A. brasilense* 137:

- 5) глибоке рихлення + ДГГ;
- 6) оранка + ДГГ;
- 7) глибоке рихлення + ПГ;
- 8) оранка + ПГ.

Використано високоолеїновий гібрид сояшнику СІ Експерто (Syngenta), стійкий до технології Clearfield®. Для бактеризації використовували штами *A. chroococcum* 2.1 та *A. brasilense* 137 з робочої колекції лабораторії фізіології мікроорганізмів Інституту сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН.

Агротехнічні заходи в досліді передбачали два способи основного обробітку ґрунту: глибоке рихлення на глибину 38–40 см та оранка на глибину до 28 см.

Система гербіцидного захисту передбачала використання досходових ґрунтових гербіцидів, а саме бакової суміші препаратів Сора-нет (1,8 л/га) та Перун (1,6 л/га), а також післясходових гербіцидів із застосуванням препарату Каптора з нормою витрати 1,0 л/га.

Потенційну азотфіксувальну активність (ПАА) ризосферного ґрунту визначали ацетиленовим методом [23]. Зразки ґрунту масою 3 г поміщали у флакони, додавали 10 мл

напіврідкого середовища Nfb (г/л: малат натрію — 5,0; K₂HPO₄ — 0,5; KH₂PO₄ — 0,5; MgSO₄·7H₂O — 0,2; NaCl — 0,1; CaCl₂ — 0,02; агар — 2,0; мл/л: розчин мікроелементів — 2,0; бромтимоловий синій (0,5 %-ий спиртовий розчин) — 2,0) [24], модифікованого додаванням маніту й глюкози (по 5,0 г/л). Закривали ватно-марлевими пробками й витримували в термостаті за температури 26–28 °С. Через 3 доби флакони герметизували, вводили ацетилен (10 % від об'єму газової фази у флаконі) та інкубували протягом доби за температури 26–28 °С. Після закінчення строку інкубації зразки аналізували на газовому хроматографі Chrom-4 з полум'яно-іонізаційним детектором. Сорбційні колонки зі сталі заповнені сорбентом Porapak Q 60–80 mesh. Температура термостату 40 °С. Витрата газів: водню — 15 см³/хв., азоту — 100 см³/хв., повітря — 500 см³/хв. Розрахунок проводили у нмоль C₂H₄ на грам ґрунту за годину.

Облік польової схожості, густоти стояння, біометричних показників (висота, суха маса) і врожайності проводили за загальноприйнятими методиками [25; 26].

Статистичну обробку даних проводили методом дисперсійного аналізу [27; 28].

Результати досліджень та їх обговорення. Початкові фази органогенезу соняшнику визначають основу подальшого розвитку рослин, тому агротехнічні умови цього періоду мають важливе значення для форму-

вання майбутньої продуктивності посівів. Аналіз отриманих результатів засвідчив, що спосіб основного обробітку ґрунту впливає на польову схожість (табл. 1). Глибоке рихлення (38–40 см) забезпечувало стабільно вищі показники у порівнянні з оранкою (до 28 см). Це можна пояснити покращенням аераційного режиму, зменшенням щільності орного шару та рівномірнішим розподілом вологи в зоні проростання насіння, що створює сприятливі умови для формування первинної кореневої системи.

Застосування гербіцидів виявило диференційований вплив на початкові етапи розвитку культури. Варіанти з післясходовим гербіцидом забезпечили вищу польову схожість, як порівняти з варіантами, де використовувалися досходові препарати. Така різниця свідчить про можливий фітотоксичний ефект ґрунтових гербіцидів (пропізохлор + прометрин) саме на стадії проростання насіння, коли рослина є чутливою до хімічних чинників. Пестициди можуть створювати локальну токсичність у прикореневій зоні, що ускладнює формування первинного кореня або затримує появу сходів. Натомість післясходові гербіциди застосовуються пізніше, минаючи критичну фазу проростання, що зменшує ризик негативного впливу на появу сходів.

Передпосівна бактеризація позитивно вплинула на рослини у всіх варіантах, підвищивши польову схожість на 3,4–6,2 % залежно від агрофону. Найвищий показник

Таблиця 1. Польова схожість насіння та густина стояння рослин соняшнику залежно від агрозаходів та бактеризації (польовий дослід), 2021 рік

Варіанти дослідів	Польова схожість, %	Густина рослин, тис./га		
		дві пари листків	початок цвітіння	перед збиранням
Без бактеризації				
Глибоке рихлення + ДГ	82,0	50,2	48,0	47,5
Оранка + ДГ	79,7	48,7	46,9	46,4
Глибоке рихлення + ПГ	85,4	52,3	49,0	48,3
Оранка + ПГ	84,9	51,7	48,4	47,4
Бактеризація <i>A. chroococcum</i> 2.1 + <i>A. brasilense</i> 137				
Глибоке рихлення + ДГ	86,1	52,4	50,8	50,3
Оранка + ДГ	83,7	51,3	49,7	49,2
Глибоке рихлення + ПГ	89,2	54,7	52,6	52,6
Оранка + ПГ	87,8	53,9	51,7	51,6
НІР ₀₅	2,8	2,1	2,5	3,2

схожості (89,2 %) та, як наслідок, найвищу густоту стояння перед збиранням (52,6 тис./га) відзначено у варіанті «глибоке рихлення + ПГ + бактеризація».

Важливим показником ефективності інтродукції діазотрофів є нітрогеназна активність у ризосфері. Дані, отримані у фазі цвітіння (табл. 2), демонструють, що всі досліджені фактори мали вплив на ПАА. По-перше, інокуляція штамми *A. chroococcum* 2.1 та *A. brasilense* 137 істотно підвищила активність азотфіксації. В середньому за варіантами бактеризація підвищила активність із 37,7 (контроль) до 80,5 нмоль C_2H_4 / г ґрунту за год. По-друге, глибоке рихлення (38–40 см) забезпечувало вищу ПАА, ніж оранка (до 28 см). Наприклад, у варіантах із бактеризацією та ДГГ, ПАА при глибокому рихленні становила 74,6 нмоль C_2H_4 / г ґрунту за год., тоді як при оранці — 61,7 нмоль C_2H_4 / г ґрунту за год. Це може свідчити, що покращена аерація ґрунту при глибокому безполицевому обробітку створює сприятливіші умови для аеробних бактерій роду *Azotobacter* і мікроаерофільних діазотрофів роду *Azospirillum*. По-третє, виявлено різницю у негативному впливі гербіцидів на потенційну активність азотфіксації ризосферного ґрунту. Досходові ґрунтові гербіциди (пропізохлор + прометрин) помітно пригнічували ПАА. Натомість післясходові гербіциди (імазамокс + імазапір) виявилися менш токсичними. У варіанті з глибоким рихленням і бактеризацією за-

стосування ПГ сприяло досягненню ПАА рівня 97,3 нмоль C_2H_4 /г ґрунту за год, що на 30 % вище, ніж в аналогічному варіанті з ДГГ (74,6 нмоль C_2H_4 / г ґрунту за год.).

Аналіз біометричних показників виявив позитивну дію діазотрофів за різних варіантів агрозаходів (табл. 2). Бактеризація позитивно вплинула на лінійний ріст: висота рослин у варіантах з *A. chroococcum* 2.1 і *A. brasilense* 137 досягла 196,8–199,9 см, що на 9,9–13,7 см перевищує відповідні показники варіантів без обробки.

Накопичення сухої маси також варіювало під впливом технологічних прийомів. Найвищий показник (3,91 т/га) зафіксовано у варіанті з азотобактером і азоспірилами за глибокого рихлення у поєднанні з ґрунтовими гербіцидами, тоді як у варіантах з оранкою та післясходовими гербіцидами біомаса була меншою.

Урожайність є інтегральним показником, що відображає сукупний вплив усіх агрозаходів. Співставлення результатів мікробіологічних аналізів (2021 р.) із продуктивністю культури виявило, що максимальна нітрогеназна активність не збігалася з найвищим урожаєм. Зокрема, у 2021 році варіант із найвищою ПАА (глибоке рихлення + ПГ + бактеризація) поступився за продуктивністю аналогічному варіанту з ґрунтовими гербіцидами (3,44 проти 3,68 т/га). Ця закономірність щодо переваги варіантів із ДГГ збереглася і в наступні роки досліджень (табл. 3).

Таблиця 2. Вплив агрозаходів і бактеризації на біометричні показники соняшнику та азотфіксуючу активність ризосферного ґрунту (польовий дослід, фаза цвітіння), 2021 рік

Варіанти дослідів	ПАА, нмоль C_2H_4 / г сухого ґрунту за годину	Висота рослин, см	Суха маса рослин, т/га
Без бактеризації			
Глибоке рихлення + ДГГ	33,7 ± 3,2	186,2 ± 2,1	3,42 ± 0,09
Оранка + ДГГ	21,2 ± 1,8	184,7 ± 2,7	3,09 ± 0,07
Глибоке рихлення + ПГ	53,3 ± 4,7	187,5 ± 3,0	3,50 ± 0,10
Оранка + ПГ	42,6 ± 4,0	186,6 ± 2,9	3,18 ± 0,07
Бактеризація <i>A. chroococcum</i> 2.1 + <i>A. brasilense</i> 137			
Глибоке рихлення + ДГГ	74,6 ± 5,3	199,9 ± 2,9	3,91 ± 0,08
Оранка + ДГГ	61,7 ± 5,9	198,0 ± 3,7	3,59 ± 0,09
Глибоке рихлення + ПГ	97,3 ± 7,8	197,4 ± 3,2	3,54 ± 0,10
Оранка + ПГ	88,5 ± 8,2	196,8 ± 3,4	3,29 ± 0,06

Проте варіант із помітно нижчою ПАА (глибоке рихлення + ДГГ + бактеризація) забезпечив максимальну середню продуктивність — 3,09 т/га. Найвищі показники в цьому варіанті отримано як у рік визначення азотфіксації (3,68 т/га у 2021 р.), так і в наступні роки (3,13 та 2,47 т/га). Така невідповідність між найвищою азотфіксувальною активністю, встановленою на фоні післясходових гербіцидів, та фактичною врожайністю вказує на наявність іншого лімітуючого чинника, не пов'язаного з азотфіксацією, а саме — фітотоксичного стресу рослини-господаря.

Наше припущення щодо стресу від післясходових гербіцидів групи імідазоліонів прямо підтверджується біометричними даними (табл. 2). Незважаючи на найвищу ПАА (97,3 нмоль C_2H_4 / г за год.) у варіанті з глибоким рихленням, післясходовими гербіцидами і бактеризацією, суха маса рослин у фазі цвітіння (3,54 т/га) була нижчою від варіанту «глибоке рихлення + ДГГ + бактеризація» (3,91 т/га). Отже, гербіцидний стрес на початку розвитку соняшнику виявився настільки значним, що рослини не змогли реалізувати переваги впливу інтродукованих діазотрофів.

Узагальнення спостережень та аналіз отриманих експериментальних даних свідчать, що ефективність інокулянту в агроценозах соняшнику визначається комплексом факторів і лімітується не лише безпосереднім впливом пестицидів на мікроорганізми, а й фізіологічним станом рослини-господаря. Встановлено, що система основного обробітку ґрунту є вагомим фактором регулювання активності діазотрофів: глибоке безполицеве рихлення створює сприятливіші умови для функціонування інтродукованих бактерій у порівнянні з оранкою, що узгоджується з результатами інших дослідників щодо впливу агротехнічних заходів на структуру мікробних угруповань [13]. Однак зафіксована нами відсутність прямої залежності між максимальною азотфіксувальною активністю ризосфери й кінцевою продуктивністю культури вказує на домінуючу роль фітотоксичного стресу в реалізації потенціалу мікроорганізмів.

Найбільш показовим є виявлений ефект у варіантах із застосуванням післясходових гербіцидів групи імідазоліонів. Хоча ці пре-

парати виявили меншу токсичність щодо мікробіоти *in situ*, забезпечуючи високі показники нітрогеназної активності, кінцева врожайність соняшнику була достовірно нижчою, як порівняти з використанням ґрунтових гербіцидів. Це пояснюється специфічним фітотоксичним впливом імідазоліонів на рослину-господаря, який може проявлятися у вигляді пригнічення фотосинтетичної активності та тимчасової затримки росту [19], особливо коли дія гербіциду посилюється абіотичними факторами [20]. Ослаблена хімічним навантаженням рослина не здатна ефективно підтримувати асоціативні зв'язки з мікроорганізмами.

Натомість застосування ґрунтових досходових гербіцидів, попри їхню вищу інгібувальну дію на азотфіксацію, дозволило уникнути критичного фізіологічного навантаження на вегетуючі рослини. Завдяки відсутності прямого гербіцидного стресу в критичні фази розвитку у поєднанні з глибоким рихленням, рослини змогли повною мірою реалізувати позитивний вплив інокулянту, що забезпечило формування найвищої продуктивності в досліді. Отримані результати підтверджують необхідність комплексного підходу при інтеграції хімічних і біологічних методів, де варто враховувати не лише пряму токсичність пестицидів для діазотрофів [4], а передусім їхній вплив на фізіологічний стан культури, яка є важливою ланкою рослинно-мікробної системи.

Висновки. На основі комплексного аналізу експериментальних даних встановлено, що висока потенційна нітрогеназна активність ризосферного ґрунту не супроводжувалася формуванням максимальної продуктивності соняшнику, що пояснюється впливом фітотоксичного стресу рослини-господаря на реалізацію біотехнологічного потенціалу інокулянту. Виявлено диференційовану дію гербіцидів різних хімічних груп на компоненти агроценозу: післясходові препарати групи імідазоліонів виявляють меншу токсичність щодо інтродукованих в агроценоз діазотрофів *A. chroococcum* і *A. brasilense*, забезпечуючи високі показники азотфіксації, проте вони спричиняють фізіологічну депресію культури, яка нівелює позитивний ефект від бактеризації. Натомість застосування ґрунтових досходових гербіцидів, попри їхню вищу інгібувальну дію на мікробіоту, дозво-

ляє уникнути критичного хімічного навантаження на вегетуючі рослини, що у поєднанні з глибоким безполицевим рихленням (38–40 см) і передпосівною інокуляцією насіння формує оптимальну агротехнологічну модель вирощування. За такої системи створюються сприятливі агрофізичні умови для функціонування мікробно-рослинної асоціації, що забезпечує максимальну в досліді середню врожайність на рівні 3,09 т/га.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Qadir A., Skakun S., Becker-Reshef I., Kusul N., Shelestov A. Estimation of sunflower planted areas in Ukraine during full-scale russian invasion: Insights from Sentinel-1 SAR data. *Science of remote sensing*. 2024. Vol. 10. 100139. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2024.100139>
2. Коць С. Я. Біологічна фіксація азоту: досягнення та перспективи розвитку. *Фізіологія рослин і генетика*. 2021. Т. 53, № 2. С. 128–159. <https://doi.org/10.15407/frg2021.02.128>
3. Sawicka B., Barbaś P., Vambol V., Skiba D., Pszczółkowski P., Niazi P., Bienia B. Applied microbiology for sustainable agricultural development. *Applied microbiology*. 2025. Vol. 5, № 3. P. 78. <https://doi.org/10.3390/applmicrobiol5030078>
4. Shahid M., Zaidi A., Ehtram A., Khan M. S. In vitro investigation to explore the toxicity of different groups of pesticides for an agronomically important rhizosphere isolate *Azotobacter vinelandii*. *Pesticide biochemistry and physiology*. 2019. Vol. 157. P. 33–44. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2019.03.006>
5. Ambrosini A., Stefanski T., Lisboa B. B., Beneduzi A., Vargas L. K., Passaglia L. M. P. Diazotrophic bacilli isolated from the sunflower rhizosphere and the potential of *Bacillus mycoides* B38V as biofertiliser. *Annals of Applied Biology*. 2015. Vol. 168, № 1. P. 93–110. <https://doi.org/10.1111/aab.12245>
6. Бердніков О. М., Волкогон В. В., Потапенко Л. В., Козар С. Ф. Агрохімічна оцінка ефективності біопрепаратів у вузькоспеціалізованій сівозміні. *Сільськогосподарська мікробіологія*. 2020. № 31. С. 44–50. <https://doi.org/10.35868/1997-3004.31.44-50>
7. Бунас А. А., Ткач Є. Д., Дворецький В. В. Біопрепарати в Україні та світі: сучасні тренди й перспективи. *Агроекологічний журнал*. 2024. № 4. С. 132–145. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2024.317163>
8. Domaratskiy Y., Kovalenko O., Kachanova T., Pichura V., Zadorozhnii Y. Analysis of the effectiveness of biological plant protection on sunflower productivity under different census density in the non-irrigated conditions of the steppe zone. *Ecological engineering & environmental technology*. 2023. Vol. 24, № 9. P. 45–54. <https://doi.org/10.12912/13797050/173004>
9. Panfilova A., Drobitko A., Markova N., Domaratskiy Y. Influence of biological products on the productivity of high oleic sunflower hybrids. *Scientific Horizons*. 2024. № 27(10). P. 91–101. <https://doi.org/10.48077/scihor10.2024.91>
10. Hu X., Liang A., Yao Q., Liu Z., Yu Z., Wang G., Liu J. Ridge tillage improves soil properties, sustains diazotrophic communities, and enhances extensively cooperative interactions among diazotrophs in a clay loam soil. *Frontiers in microbiology*. 2020. Vol. 11. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01333>
11. Hsu S.-F., Buckley D. H. Evidence for the functional significance of diazotroph community structure in soil. *The ISME Journal*. 2008. Vol. 3, № 1. P. 124–136. <https://doi.org/10.1038/ismej.2008.82>
12. Khare E., Arora N. K. Effects of soil environment on field efficacy of microbial inoculants. *Plant microbes symbiosis: applied facets*. New Delhi, 2014. P. 353–381. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2068-8_19
13. Li Y., Li T., Zhao D., Wang Z., Liao Y. Different tillage practices change assembly, composition, and co-occurrence patterns of wheat rhizosphere diazotrophs. *Science of the total environment*. 2021. Vol. 767. 144252. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144252>
14. Shi Y., Gahagan A. C., Morrison M. J., Gregorich E., Lapen D. R., Chen W. Stratified effects of tillage and crop rotations on soil microbes in carbon and nitrogen cycles at different soil depths in long-term corn, soybean, and wheat cultivation. *Microorganisms*. 2024. Vol. 12, № 8. 1635. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12081635>
15. Rousk J., Brookes P. C., Bååth E. Contrasting soil pH effects on fungal and bacterial growth suggest functional redundancy in carbon mineralization. *Applied and environmental microbiology*. 2009. Vol. 75, № 6. P. 1589–1596. <https://doi.org/10.1128/aem.02775-08>
16. Helgason B. L., Walley F. L., Germida J. J. Fungal and bacterial abundance in long-term no-till and intensive-till soils of the northern great plains. *Soil science society of america journal*. 2009. Vol. 73, № 1. P. 120–127. <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0392>
17. Wang C., Kuzyakov Y. Mechanisms and implications of bacterial-fungal competition for soil resources. *The ISME Journal*. 2024. Vol. 18, № 1. wrae073. <https://doi.org/10.1093/ismejo/wrae073>
18. Mertens M., Höss S., Neumann G., Afzal J., Reichenbecher W. Glyphosate, a chelating agent — relevant for ecological risk assessment? *Environmental science and pollution research*. 2018. Vol. 25,

№ 6. P. 5298–5317. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-1080-1>

19. Balabanova D. A., Paunov M., Goltsev V., Cuypers A., Vangronsveld J., Vassilev A. 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*. 2016. Vol. 7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01559>

20. Bhattacharyya A., Pablo C. H. D., Mavrodi O. V., Weller D. M., Thomashow L. S., Mavrodi D. V. Rhizosphere plant-microbe interactions under water stress. *Advances in applied microbiology*. 2021. <https://doi.org/10.1016/bs.aambs.2021.03.001>

21. Шевченко С. М., Шевченко М. С., Деревенець-Шевченко К. А., Шевченко О. М., Заверталоук О. В. Ефективність прийомів основного обробітку ґрунту та контролювання бур'янів при вирощуванні соняшника. *Український журнал природничих наук*. 2025. № 11. С. 242–249. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.11.2025.26>

22. Hamzei J., Seyyedi M. Energy use and input-output costs for sunflower production in sole and intercropping with soybean under different tillage systems. *Soil and tillage research*. 2016. Vol. 157. P. 73–82. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.11.008>

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

24. Baldani J. I., Reis V. M., Videira S. S., Boddey L. H., Baldani V. L. D. The art of isolating nitrogen-fixing bacteria from non-leguminous plants using N-free semi-solid media: a practical guide for microbiologists. *Plant and soil*. 2014. Vol. 384, № 1–2. P. 413–431. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2186-6>

25. Єщенко В. О., Копитко П. Г., Опришко В. П., Костогриз П. В. Основи наукових досліджень в агрономії: підручник / за ред. В. О. Єщенка. Київ : Дія, 2005. 288 с.

26. Основи науково-дослідної справи в агрономії: навч. посіб. / С. А. Балюк, В. В. Кифоренко, В. О. Єщенко та ін.; за ред. В. О. Єщенка. Харків : ХНАУ, 2015. 344 с.

27. Hinkelmann K., Kempthorne O. Design and Analysis of Experiments. Vol. 1: Introduction to Experimental Design. 2nd ed. Hoboken, New Jersey : J. Wiley and Sons, 2008. 631 p.

28. Hinkelmann K., Kempthorne O. Design and Analysis of Experiments. Vol. 2: Advanced Experimental Design. 1st ed. Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2005. 780 p.

Отримано: 02.09.2025

Прийнято до друку: 07.10.2025

Опубліковано онлайн: 29.12.2025

<https://doi.org/10.35868/1997-3004.42.72-82>

UDC 633.854.78: 631.51:632.954:579.64

EFFECTIVENESS OF SUNFLOWER BACTERIZATION BY DIASOTROPHES UNDER THE IMPACT OF VARIOUS HERBICIDES AND SOIL TREATMENT METHODS

O. S. Duka¹, <https://orcid.org/0009-0006-5138-2805>,

S. F. Kozar^{1,2}, <https://orcid.org/0000-0003-1341-5603>,

Yu. O. Vorobei¹, <https://orcid.org/0000-0003-4505-6676>,

O. V. Lohosha^{1,2}, <https://orcid.org/0000-0002-4725-9381>,

O. M. Bilokonska¹, <https://orcid.org/0000-0001-5080-7302>

¹Institute of Agricultural Microbiology and Agroindustrial Manufacture, NAAS, Chernihiv

²Chernihiv Polytechnic National University

e-mail: kozarsf@gmail.com

Objective. To determine the effect of herbicides of various chemical groups and methods of the main soil cultivation on the functional activity of nitrogen-fixing bacteria *Azotobacter chroococcum* 2.1 and *Azospirillum brasilense* 137 and their effectiveness in sunflower cultivation in the Polissia

region of Ukraine. **Methods.** Field studies were conducted in Chernihiv region on sod-podzolic light loamy soil. The research scheme included two methods of main soil cultivation (plowing and deep loosening), as well as two options for herbicide application (pre-sowing: Sora-net 1.8 l/ha (propyzochlor) + Perun 1.6 l/ha (prometryn); post-sowing: Kaptora 1.0 l/ha (imazamox + imazapyr)). Seeds of the SI Experto sunflower hybrid were treated with diazotrophs *A. chroococcum* 2.1 and *A. brasilense* 137. The nitrogen-fixing activity of diazotrophs was determined using the acetylene method. **Results.** It has been determined that deep soil loosening provides a better field germination compared to plowing. A differentiated effect of herbicides on nitrogen fixation has been observed: the use of post-sowing preparations provides a higher nitrogenase activity in the flowering phase than the use of pre-sowing soil preparations. At the same time, it has been found that despite higher nitrogen fixation activity, post-sowing herbicide treatments resulted in lower sunflower productivity. The lack of correlation between high nitrogen fixation activity and yield may indicate the phytotoxic effect of post-sowing herbicides on the plant, which negates the benefits of nitrogen fixation. The highest average crop yield for three years has been obtained in the variant with bacterization, deep loosening, and pre-sowing herbicides — 3.09 t/ha, which is 18.8 % higher than the control indicator. **Conclusions.** Sunflower productivity is limited by the phytotoxic effect of post-sowing herbicides on the host plant. The optimal technological model is defined as a combination of deep soil loosening, the use of pre-sowing soil herbicides, and pre-sowing inoculation of seeds with diazotrophs *A. chroococcum* 2.1 and *A. brasilense* 137. This complex approach minimizes chemical stress during critical phases of plant development, which contributes to the biological potential of the crop realization.

Key words: diazotrophs, herbicides, deep loosening, plowing, sunflower, yield.

REFERENCES

1. Qadir, A., Skakun, S., Becker-Reshef, I., Kusul, N., & Shelestov, A. (2024). Estimation of sunflower planted areas in Ukraine during full-scale Russian invasion: Insights from Sentinel-1 SAR data. *Science of Remote Sensing*, 10, 100139. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2024.100139>
2. Kots, S. Ya. (2021). Biologichna fiksatsiia azotu: dosiahnennia ta perspektyvy rozvytku [Biological nitrogen fixation: achievements and prospects of development]. *Fiziologhiia roslyn i henetyka — Physiology of Plants and Genetics*, 53(2), 128–159 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/frg.2021.02.128>
3. Sawicka, B., Barbaś, P., Vambol, V., Skiba, D., Pszczółkowski, P., Niazi, P., & Bienia, B. (2025). Applied microbiology for sustainable agricultural development. *Applied Microbiology*, 5(3), 78. <https://doi.org/10.3390/applmicrobiol5030078>
4. Shahid, M., Zaidi, A., Ehtram, A., & Khan, M. S. (2019). In vitro investigation to explore the toxicity of different groups of pesticides for an agronomically important rhizosphere isolate *Azotobacter vinelandii*. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 157, 33–44. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2019.03.006>
5. Ambrosini, A., Stefanski, T., Lisboa, B. B., Beneduzi, A., Vargas, L. K., & Passaglia, L. M. P. (2015). Diazotrophic bacilli isolated from the sunflower rhizosphere and the potential of *Bacillus mycoides* B38V as biofertiliser. *Annals of Applied Biology*, 168(1), 93–110. <https://doi.org/10.1111/aab.12245>
6. Berdnikov, O. M., Volkogon, V. V., Potapenko, L. V., & Kozar, S. F. (2020). Agrokhimichna otsinka efektyvnosti biopreparativ u vuz'kospetsializovani sivozmini [Agrochemical evaluation of the effectiveness of biopreparations in a narrow-specialized crop rotation]. *Silskohospodarska mikrobiologhiia — Agricultural Microbiology*, 31, 44–50 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.35868/1997-3004.31.44-50>
7. Bunas, A. A., Tkach, Ye. D., & Dvoretzkyi, V. V. (2024). Biopreparaty v Ukraini ta sviti: suchasni trendy y perspektyvy [Biopreparations in Ukraine and worldwide: current trends and prospects]. *Ahroekologichnyi zhurnal — Agroecological Journal*, 4, 132–145 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2024.317163>
8. Domaratskiy, Y., Kovalenko, O., Kachanova, T., Pichura, V., & Zadorozhnii, Y. (2023). Analysis of the effectiveness of biological plant protection on sunflower productivity under different census density in the non-irrigated conditions of the steppe zone. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 24(9), 45–54. <https://doi.org/10.12912/27197050/173004>
9. Panfilova, A., Drobitko, A., Markova, N., & Domaratskiy, Y. (2024). Influence of biological products on the productivity of high oleic sunflower hybrids. *Scientific Horizons*, 27(10), 91–101. <https://doi.org/10.48077/scihor10.2024.91>
10. Hu, X., Liang, A., Yao, Q., Liu, Z., Yu, Z., Wang, G., & Liu, J. (2020). Ridge tillage improves soil properties, sustains diazotrophic communities, and enhances extensively cooperative interactions

- among diazotrophs in a clay loam soil. *Frontiers in Microbiology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01333>
11. Hsu, S.-F., & Buckley, D. H. (2008). Evidence for the functional significance of diazotroph community structure in soil. *The ISME Journal*, 3(1), 124–136. <https://doi.org/10.1038/ismej.2008.82>
12. Khare, E., & Arora, N. K. (2014). Effects of soil environment on field efficacy of microbial inoculants. In *Plant microbes symbiosis: Applied facets* (pp. 353–381). Springer India. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2068-8_19
13. Li, Y., Li, T., Zhao, D., Wang, Z., & Liao, Y. (2020). Different tillage practices change assembly, composition, and co-occurrence patterns of wheat rhizosphere diazotrophs. *Science of the Total Environment*, 767, 144252. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144252>
14. Shi, Y., Gahagan, A. C., Morrison, M. J., Gregorich, E., Lapen, D. R., & Chen, W. (2024). Stratified effects of tillage and crop rotations on soil microbes in carbon and nitrogen cycles at different soil depths in long-term corn, soybean, and wheat cultivation. *Microorganisms*, 12(8), 1635. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12081635>
15. Rousk, J., Brookes, P. C., & Bååth, E. (2009). Contrasting soil pH effects on fungal and bacterial growth suggest functional redundancy in carbon mineralization. *Applied and Environmental Microbiology*, 75(6), 1589–1596. <https://doi.org/10.1128/aem.02775-08>
16. Helgason, B. L., Walley, F. L., & Germida, J. J. (2009). Fungal and bacterial abundance in long-term no-till and intensive-till soils of the northern great plains. *Soil Science Society of America Journal*, 73(1), 120–127. <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0392>
17. Wang, C., & Kuzyakov, Y. (2024). Mechanisms and implications of bacterial-fungal competition for soil resources. *The ISME Journal*, 18(1), wræ073. <https://doi.org/10.1093/ismej/wrae073>
18. Mertens, M., Höss, S., Neumann, G., Afzal, J., & Reichenbecher, W. (2018). Glyphosate, a chelating agent — relevant for ecological risk assessment? *Environmental Science and Pollution Research*, 25(6), 5298–5317. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-1080-1>
19. 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. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01559>
20. Bhattacharyya, A., Pablo, C. H. D., Mavrodi, O. V., Weller, D. M., Thomashow, L. S., & Mavrodi, D. V. (2021). Rhizosphere plant-microbe interactions under water stress. In *Advances in Applied Microbiology*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.aambs.2021.03.001>
21. Shevchenko, S. M., Shevchenko, M. S., De-revenets-Shevchenko, K. A., Shevchenko, O. M., & Zavertaliuk, O. V. (2025). Efektyvnist' pryiomiv osnovnoho obrobittu gruntu ta kontroliuvannia bur'ianiv pry vyroshchuvanni soniashnyka [Effectiveness of primary tillage practices and weed control in sunflower cultivation]. *Ukrainskyi zhurnal pryrodnychkykh nauk — Ukrainian Journal of Natural Sciences*, 11, 242–249 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.11.2025.26>
22. Hamzei, J., & Seyyedi, M. (2016). Energy use and input-output costs for sunflower production in sole and intercropping with soybean under different tillage systems. *Soil and Tillage Research*, 157, 73–82. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.11.008>
23. Volkohon, V. V. (Ed.). (2010). *Eksperymentalna gruntova mikrobiolohiia: monohrafiia* [Experimental soil microbiology: monograph]. Kyiv: Ahrarna nauka [in Ukrainian].
24. Baldani, J. I., Reis, V. M., Videira, S. S., Boddey, L. H., & Baldani, V. L. D. (2014). The art of isolating nitrogen-fixing bacteria from non-leguminous plants using N-free semi-solid media: A practical guide for microbiologists. *Plant and Soil*, 384(1–2), 413–431. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2186-6>
25. Yeshchenko, V. O., Kopytko, P. H., Opryshko, V. P., & Kostohryz, P. V. (2005). *Osnovy naukovykh doslidzhen v ahronomii* [Fundamentals of scientific research in agronomy]. Kyiv: Diia [in Ukrainian].
26. Baliuk, S. A., Kyforenko, V. V., & Yeshchenko, V. O. (2015). *Osnovy naukovo-doslidnoi spravy v ahronomii: navchalnyi posibnyk* [Fundamentals of research work in agronomy: a textbook]. Kharkiv: KhNAU [in Ukrainian].
27. Hinkelmann, K., & Kempthorne, O. (2008). *Design and analysis of experiments. Vol. 1: Introduction to experimental design* (2nd ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
28. Hinkelmann, K., & Kempthorne, O. (2005). *Design and analysis of experiments. Vol. 2: Advanced experimental design* (1st ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

Received: 02.09.2025

Accepted: 07.10.2025

Published online: 29.12.2025