УДК 633.34:631.847.211:631.559
DOI https://doi.org/10.37406/2706-9052-2026-2-17

Угрін О. М.
здобувач наукового ступеня доктора філософії,
Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства
Національної академії аграрних наук України
смт Хліборобське, Україна
E-mail: *aleksandr.ugrin@gmail.com*
ORCID: *0009-0002-0710-5852*

Біднина І. О.
кандидат сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник,
Інститут водних проблем і меліорації Національної академії аграрних наук України
Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства
Національної академії аграрних наук України
смт Хліборобське, Україна
E-mail: *irinabidnina@ukr.net*
ORCID: *0000-0001-8351-2519*

ЕФЕКТИВНІСТЬ ДІЯЛЬНОСТІ СИМБІОТИЧНОГО АПАРАТУ ТА АКТИВНІСТЬ ЦЕЛЮЛОЗОРУЙНІВНОЇ МІКРОБІОТИ СОРТІВ СОЇ ЗА ЕНДОФІТНО-РИЗОБІАЛЬНОЇ ІНОКУЛЯЦІЇ НАСІННЯ

Анотація

В Україні питання біологізації азотного живлення сої та скорочення витрат мінеральних добрив є предметом тривалих досліджень. Проте для умов Причорномор'я України недостатньо з'ясовано комплексний вплив поєднань РизобінуК із B. velezensis IMB B-8134, Pseudomonas sp. 6 і B. megaterium УКМ B-5724 на формування бульбочкового апарату сортів різної скоростиглості та сезонну динаміку целюлозоруйнівної мікробіоти в різних шарах ґрунту. Метою дослідження було встановити особливості формування симбіотичного апарату та зміни чисельності целюлозоруйнівної мікробіоти ризосфери сортів сої Софія і Монарх залежно від передпосівної інокуляції насіння ризобіальним препаратом та його композиціями з ендофітними бактеріями. Польові дослідження проведено в Херсонській області впродовж 2023–2025 рр. Досліджували контроль без обробки, РизобінК та його композиції з Bacillus velezensis IMB B-8134, Pseudomonas sp. 6 і Bacillus megaterium УКМ B-5724. Визначали кількість і масу бульбочок у фазах гілкування та утворення бобів сої, а також чисельність целюлозоруйнівних мікроорганізмів у шарах ґрунту 0–20 і 20–40 см упродовж трьох міжфазних періодів. Найвищу біологічну ефективність забезпечила композиція РизобінК + B. velezensis IMB B-8134. У фазу гілкування вона забезпечувала формування 26–27 бульбочок масою 0,34–0,39 г на рослину, а у фазу утворення бобів – 41–49 бульбочок масою 1,21–1,45 г. Середня чисельність целюлозоруйнівних мікроорганізмів за цього варіанта становила 2,93 млн КУО/г у сорту Софія та 2,94 млн КУО/г у сорту Монарх, що перевищувало контроль відповідно на 6,1 і 11,6 %. Композиція з B. megaterium була особливо ефективною у сорту Монарх і забезпечувала 47 бульбочок загальною масою 1,43 г. Коінокуляція ризобіальними та ендофітними бактеріями сприяє оптимізації симбіотичного апарату й біологічної активності ризосфери сої. Найбільш оптимальною для обох досліджуваних сортів сої визначено композицію РизобінК + B. velezensis IMB B-8134.

Ключові слова: *сорти сої, передпосівна інокуляція, ендофітні бактерії, бульбочки, целюлозоруйнівні мікроорганізми.*

Вступ. Стабілізація виробництва сої в посушливих умовах півдня України потребує впровадження біологізованих технологічних рішень, здатних одночасно оптимізувати азотне живлення рослин, активізувати мікробіологічні процеси в ризосфері та зменшити залежність агроценозу від мінеральних азотних добрив. Визначальною ланкою такого підходу є формування ефективного бобово-ризобіального симбіозу. Кількість, маса та функціональний стан бульбочок відображають потенціал симбіотичної фіксації молекулярного азоту, однак їх формування залежить від генотипу сої, конкурентоспроможності ризобій, ґрунтово-кліматичних умов і взаємодії з іншими представниками ризосферної мікробіоти [4; 7; 10].

Передпосівна інокуляція насіння препаратами на основі *Bradyrhizobium* є базовим біологічним прийомом у технології вирощування сої. Водночас результати сучасних досліджень свідчать, що поєднання ризобій із бактеріями родів *Bacillus* і *Pseudomonas* може забезпечувати додатковий стимулювальний ефект завдяки синтезу фітогормонів, мобілізації фосфатів, продукуванню сидерофорів і антимікробних метаболітів, формуванню біоплівок та підвищенню стійкості рослин до абіотичних стресів [5; 9; 11; 12]. Реалізація переваг коінокуляції, під якою розуміють поєднане застосування ризобіальних бактерій із функціонально доповнювальними ендофітними або

© Угрін О. М., Біднина І. О., 2026 pISSN 2706-9052, eISSN 2706-851X

ризосферними штамами, значною мірою залежить від властивостей мікробних компонентів і генотипу рослин, тому потребує експериментальної перевірки в конкретних ґрунтово-кліматичних умовах.

Важливою складовою оцінювання біологізованої технології є визначення реакції ґрунтової мікробіоти. Целюлозоруйнівні мікроорганізми беруть участь у деструкції рослинних решток, трансформації органічного вуглецю та утворенні доступних для рослин сполук. Динаміка їх чисельності відображає інтенсивність мінералізаційних процесів і реакцію мікробного угруповання на кореневі виділення, умови зволоження та склад інокуляційного комплексу. Поєднане оцінювання бульбочкового апарату й целюлозоруйнівної мікробіоти дає змогу системно, об'єктивно охарактеризувати біологічну ефективність інокуляції, ніж аналіз лише врожайності або окремих морфометричних показників.

У сучасній науковій літературі коінокуляцію розглядають як спосіб формування функціонально комплементарних мікробно-рослинних систем. Ризобіальний компонент забезпечує специфічне інфікування коренів і утворення азотфіксувальних бульбочок, тоді як супутні бактерії можуть стимулювати розвиток кореневої системи, посилювати надходження фосфору й мікроелементів, впливати на гормональний баланс і знижувати негативну дію стресових чинників [9; 11]. Метааналіз результатів численних польових досліджень і масштабна виробнича валідація коінокуляції сої підтвердили, що її результативність визначається генотипом культури, властивостями ґрунту, погодними умовами, системою удобрення та способом внесення мікроорганізмів [3; 8].

Для представників роду *Bacillus* важливими є здатність утворювати стійкі спори, синтезувати широкий спектр біологічно активних речовин і здатні колонізувати ризосферу. Доведено, що сумісне застосування *B. velezensis* із *Bradyrhizobium* може збільшувати розміри бульбочок і посилювати азотфіксацію; цей ефект пов'язують із продукуванням індоліл-3-оцтової кислоти та стимулюванням розвитку кореневих тканин [9]. *Bacillus megaterium* (за сучасною номенклатурою окремі штами відносять до *Priestia megaterium*) характеризується фосфатмобілізувальною та рістрегулювальною активністю, що є важливим для енергомісткого процесу біологічної фіксації азоту. Позитивний вплив бактерій груп *Bacillus*/*Priestia* на елементи структури врожаю та продуктивність сої підтверджено також у новітніх дослідженнях [6].

Бактерії роду *Pseudomonas* здатні продукувати ауксини, сидерофори, антибіотичні сполуки та ферменти, що сприяють поліпшенню фосфорного живлення й адаптації рослин. За коінокуляції *Bradyrhizobium* і *Pseudomonas* у сої встановлено збільшення кількості й маси бульбочок, поліпшення засвоєння елементів живлення та підвищення врожайності [5; 11]. Водночас різні штами *Pseudomonas* неоднаково взаємодіють із ризобіями, що підтверджує необхідність польового випробування кожної конкретної бактеріальної композиції.

В Україні питання біологізації азотного живлення сої та скорочення витрат мінеральних добрив є предметом тривалих досліджень [1; 2]. Проте для умов Причорномор'я України недостатньо з'ясовано комплексний вплив поєднань РизобінуК із *B. velezensis* ІМВ В-8134, *Pseudomonas sp. 6* і *B. megaterium* УКМ В-5724 на формування бульбочкового апарату сортів різної скоростиглості та сезонну динаміку целюлозоруйнівної мікробіоти в різних шарах ґрунту. Це визначило наукову спрямованість і актуальність проведеного дослідження.

Мета роботи – встановити закономірності формування кількості й маси бульбочок на коренях сортів сої Софія і Монарх та зміни чисельності целюлозоруйнівних мікроорганізмів у шарах ґрунту 0–20 і 20–40 см залежно від передпосівної інокуляції насіння РизобіномК і його композиціями з ендофітними бактеріями в умовах Причорномор'я України.

Матеріал і методи. Польові дослідження проводили впродовж 2023–2025 рр. у Херсонській області на дослідних полях Інституту кліматично орієнтованого сільського господарства НААН на темно-каштановому ґрунті. Схема двофакторного досліду передбачала: фактор А – сорт сої (Софія, Монарх); фактор В – передпосівна інокуляція (контроль без обробки; РизобінК; РизобінК + *Bacillus velezensis* ІМВ В-8134; РизобінК + *Pseudomonas sp. 6*; РизобінК + *Bacillus megaterium* УКМ В-5724). Кількість і масу бульбочок визначали в розрахунку на одну рослину у фазах гілкування та утворення бобів. Для мікробіологічного аналізу зразки ґрунту відбирали з шарів 0–20 і 20–40 см у три міжфазні періоди: гілкування – цвітіння; цвітіння – утворення бобів; утворення бобів – дозрівання бобів. Чисельність целюлозоруйнівних мікроорганізмів виражали в млн КУО/г абсолютно сухого ґрунту. Польові обліки, відбір зразків і статистичне опрацювання результатів здійснювали за загальноприйнятими методиками польового досліду та агрономічних досліджень [12]. Істотність відмінностей оцінювали за $НІР_{0,05}$.

Виклад основного матеріалу дослідження. У результаті досліджень встановлено, що у фазу гілкування сорти сої Софія і Монарх на контролі формували по 12 бульбочок на рослину, однак їх маса у сорту Монарх була дещо вищою – 0,21 проти 0,20 г у (табл. 1).

Застосування препарату РизобінуК збільшило кількість бульбочок до 16 шт. у та 17 шт. у сорту сої Монарх, а їх масу – до 0,29 і 0,30 г відповідно. Отже, вже на початковому етапі симбіогенезу специфічна ризобіальна інокуляція забезпечила приріст кількості бульбочок на 33,3–41,7% а їх маси на 42,9–45,0% порівняно з контролем (без обробки насіння).

Найвиразніший ранній ефект забезпечила композиція РизобінК + *B. velezensis* ІМВ В-8134. Кількість бульбочок у сорту сої Софія становила 26 шт., у сорту Монарх – 27 шт., що перевищувало контроль відповідно у 2,17 та 2,25 рази. Маса бульбочок зросла до 0,34 і 0,39 г, або на 70,0 та 85,7%. Перевищення $НІР_{0,05}$ підтверджує істотність відмінностей за обома показниками. Композиція РизобінК + *B. megaterium* УКМ В-5724 також

забезпечила значне збільшення кількості бульбочок – до 25 і 26 шт., проте за масою дещо поступалася варіанту з *B. velezensis*. Варіант із обробкою насіння сої препаратом *Pseudomonas sp. 6* займав проміжне положення: 21–22 бульбочки масою 0,30–0,31 г.

Таблиця 1. Формування бульбочок на кореневій системі сортів сої залежно від передпосівної інокуляції насіння (середнє за 2023–2025 рр.)

Сорт	Варіант інокуляції	Гілкування–цвітіння		Утворення–дозрівання бобів	
		кількість, шт.	маса, г	кількість, шт.	маса, г
Софія	Контроль (без обробки насіння)	12	0,20	22	0,45
	РизобінК	16	0,29	31	1,06
	РизобінК + *B. velezensis* ІМВ В-8134	26	0,34	41	1,21
	РизобінК + *Pseudomonas sp.* 6	21	0,30	36	1,10
	РизобінК + *B. megaterium* УКМ В-5724	25	0,31	34	1,08
	$НІР_{0,05}$	5,07	0,04	6,49	0,29
Монарх	Контроль (без обробки насіння)	12	0,21	31	1,03
	РизобінК	17	0,30	41	1,32
	РизобінК + *B. velezensis* ІМВ В-8134	27	0,39	49	1,45
	РизобінК + *Pseudomonas sp.* 6	22	0,31	42	1,36
	РизобінК + *B. megaterium* УКМ В-5724	26	0,36	47	1,43
	$НІР_{0,05}$	5,38	0,06	6,03	0,15

До фази утворення бобів відмінності між варіантами посилилися. На контролі сорт сої Софія формувала 22 бульбочки масою 0,45 г, Монарх – 31 бульбочку масою 1,03 г. Застосування РизобінК збільшувало відповідні показники до 31 шт. і 1,06 г у та 41 шт. і 1,32 г у сорту Монарх. Найбільшу кількість бульбочок було встановлено за застосування РизобінуК + *B. velezensis* ІМВ В-8134 – 41 шт. у сорту Софія та 49 шт. – у сорту Монарх; маса становила 1,21 і 1,45 г. Порівняно з контролем кількість бульбочок зросла на 86,4% у та на 58,1% у сорту Монарх, маса – відповідно у 2,69 рази та на 40,8%.

Високою ефективністю характеризувалася також композиція з *B. megaterium* УКМ В-5724, особливо у сорту сої Монарх, де встановлено 47 бульбочок масою 1,43 г, тобто за масою лише на 0,02 г менше від максимального варіанта. У сорту Софія цей варіант забезпечував формування 34 бульбочок масою 1,08 г. Застосування композиції з *Pseudomonas sp. 6* формувало 36 і 42 бульбочки масою 1,10 і 1,36 г відповідно у сортів Софія та Монарх. Таким чином, застосування *B. velezensis IMB B-8134* виявило найбільш універсальну сумісність з обома сортами, тоді як *B. megaterium УКМ В-5724* мав особливо виражений ефект саме у сорту Монарх.

У фазу гілкування абсолютні значення кількості бульбочок у досліджуваних сортів сої були близькими. У фазу утворення бобів сорт Монарх переважав дані сорту Софія за кількістю і масою бульбочок у всіх варіантах. Водночас відносна реакція на інокуляцію за масою бульбочок була сильнішою у сорту сої Софія, що пояснюється нижчим контрольним рівнем цього показника. Це свідчить, що абсолютні та відносні ефекти інокуляції слід інтерпретувати спільно, не ототожнюючи більший приріст із вищою загальною потужністю симбіотичного апарату.

Виявлені закономірності узгоджуються з даними про здатність препарату *B. velezensis* стимулювати ріст бульбочок і підвищувати ефективність симбіотичної азотфіксації [4]. Висока результативність композиції з *B. megaterium* може бути пов'язана з покращенням фосфорного живлення, оскільки редукція молекулярного азоту є енергомістким процесом і потребує достатнього забезпечення рослин фосфором. Ефект *Pseudomonas sp. 6* відповідає результатам досліджень, у яких подвійна інокуляція *Bradyrhizobium* і *Pseudomonas* посилювала симбіотичну ефективність, живлення та продуктивність сої [5, 6].

Чисельність целюлозоруйнівних мікроорганізмів змінювалася залежно від сорту, складу інокуляційного комплексу, шару ґрунту та міжфазного періоду (табл. 2).

У сорту сої Софія в шарі ґрунту 0–20 см на контролі (без обробки насіння) показник чисельності целюлозоруйнівних мікроорганізмів становив 2,57–3,03 млн КУО/г. Максимальне значення чисельності в цьому шарі – 3,83 млн КУО/г – встановлено за обробки насіння сої препаратом РизобінуК у міжфазний період цвітіння–утворення бобів. Наприкінці досліджуваної сезонної динаміки найвищу чисельність – 3,46 млн КУО/г – забезпечила композиція РизобінК + *B. megaterium УКМ В-5724*. Це перевищувало контроль на 0,43 млн КУО/г і $НІР_{0,05}$ для відповідного періоду.

У шарі 20–40 см у найбільш стабільною була дія композиції РизобінК + *B. velezensis IMB B-8134*: 2,99; 2,49 і 3,13 млн КУО/г у трьох міжфазних періодах. Наприкінці вегетації цей варіант перевищував контроль на 0,25 млн КУО/г, або на 8,7%. Для *B. megaterium* у глибшому шарі на ранніх етапах відзначено нижчі значення – 2,21 і 2,16 млн КУО/г, проте у третьому періоді чисельність зростала до 3,02 млн КУО/г. Отже, стимулювальний ефект цього штаму був локалізований переважно у верхньому шарі та пізнішому періоді розвитку рослин.

У сорту сої Монарх найбільша рання чисельність целюлозоруйнівних мікроорганізмів у верхньому шарі ґрунту – 3,25 млн КУО/г – сформувалася за обробки РизобіномК; варіант із додатковим використанням *Pseudomonas sp.* 6 забезпечував 3,11 млн КУО/г. У шарі ґрунту 20–40 см найстабільнішою та найвищою була

чисельність за обробки насіння сої РизобіномК + *B. velezensis IMB B-8134*: 3,13; 2,93 і 3,15 млн КУО/г. Ці значення перевищували контроль відповідно на 0,14; 0,76 та 0,49 млн КУО/г, а у другому і третьому періодах визначення різниця була істотною. Таким чином, композиція з *B. velezensis* не завжди забезпечувала абсолютний максимум у поверхневому шарі, проте формувала найбільш вирівняний і стійкий мікробіологічний ефект у шарі ґрунту 20–40 см, особливо у сорту Монарх.

Таблиця 2. Чисельність целюлозоруйнівних мікроорганізмів у ризосфері сортів сої залежно від інокуляції, млн КУО/г абсолютно сухого ґрунту (середнє за 2023–2025 рр.)

Сорт	Варіант інокуляції	Шар ґрунту, см	Гілкування–цвітіння	Цвітіння–утворення бобів	Утворення–дозрівання бобів
Софія	Контроль (без обробки насіння)	0–20	2,57	2,45	3,03
		20–40	2,68	2,94	2,88
	РизобінК	0–20	2,80	3,83	2,94
		20–40	2,54	2,53	2,70
	РизобінК + *B. velezensis* ІМВ В-8134	0–20	2,98	3,00	2,97
		20–40	2,99	2,49	3,13
	РизобінК + *Pseudomonas sp.* 6	0–20	2,81	2,80	2,78
		20–40	2,56	2,69	2,72
	РизобінК + *B. megaterium* УКМ В-5724	0–20	2,97	2,89	3,46
		20–40	2,21	2,16	3,02
Монарх	Контроль (без обробки насіння)	0–20	2,74	2,49	2,74
		20–40	2,99	2,17	2,66
	РизобінК	0–20	3,25	2,83	2,66
		20–40	2,87	2,65	2,41
	РизобінК + *B. velezensis* ІМВ В-8134	0–20	2,85	2,85	2,72
		20–40	3,13	2,93	3,15
	РизобінК + *Pseudomonas sp.* 6	0–20	3,11	2,61	2,99
		20–40	2,24	2,44	2,74
	РизобінК + *B. megaterium* УКМ В-5724	0–20	2,87	2,82	2,68
		20–40	2,21	2,82	2,72
	$НІР_{0,05}$	0–20	0,21	0,19	0,14
	$НІР_{0,05}$	20–40	0,17	0,19	0,13

Усереднення спостережень для кожної комбінації сорту й інокулянта показало, що найвищий загальний рівень чисельності целюлозоруйнівної мікробіоти сформувався за використання композиції РизобінК + *B. velezensis IMB B-8134*: 2,93 млн КУО/г у та 2,94 млн КУО/г у сорту сої Монарх. Порівняно з контролем приріст становив відповідно 6,1 та 11,6%. При застосуванні РизобінуК середні значення становили 2,89 і 2,78 млн КУО/г, для *Pseudomonas sp. 6* – 2,73 і 2,69, для *B. megaterium* – відповідно 2,79 і 2,69 млн КУО/г. Отже, загальний ефект композицій визначався не тільки максимальним разовим значенням, а й рівномірністю реакції за профілем ґрунту та фазами розвитку сої.

Комплексний аналіз морфометричних і мікробіологічних показників засвідчив, що використання композиції РизобінК + *B. velezensis* ІМВ В-8134, яка була найефективнішою за бульбочкоутворенням, одночасно забезпечувала найвищу середню чисельність целюлозоруйнівних мікроорганізмів. Це дає підстави припускати формування більш функціонально узгодженої системи «рослина – бульбочкові бактерії – ризосферна мікробіота». Водночас окремі максимальні значення при застосуванні РизобінуК або композиції разом з *B. megaterium* у певних шарах і фазах свідчать, що реакція мікробіоценозу є складнішою, ніж реакція бульбочкового апарату, і залежить від локалізації кореневих виділень, запасів органічного субстрату та сезонної динаміки гідротермічних умов.

Морфометричні показники бульбочок не є прямим відображенням нітрогеназної активності, однак більша кількість і маса функціонально активних бульбочок створюють передумови для підвищення азотфіксувального потенціалу. За п'ятьма варіантами інокуляції в межах кожного сорту встановлено тісний позитивний кореляційний зв'язок між кількістю бульбочок у фазу утворення бобів і врожайністю: r = 0,97 у та r = 0,87 у сорту сої Монарх; для маси бульбочок відповідні коефіцієнти становили r = 0, 95 і r = 0,82. Цей розрахунок має аналітичний характер і базується на середніх значеннях п'яти варіантів, проте підтверджує практичну значущість оптимізації діяльності симбіотичного апарату.

Висновки. Передпосівна інокуляція насіння сої за результатами трирічних даних істотно впливала на ефективність формування симбіотичного апарату та чисельність целюлозоруйнівної мікробіоти ризосфери сортів сої Софія і Монарх. Найбільш універсальною та стабільною є композиція РизобінК + *Bacillus velezensis* ІМВ В-8134. У фазу гілкування її застування забезпечувало формування 26–27 бульбочок масою 0,34–0,39 г, а у фазу утворення бобів – 41–49 бульбочок масою 1,21–1,45 г на рослину. За цього ж варіанту встановлено найвищу середню чисельність целюлозоруйнівних мікроорганізмів – 2,93–2,94 млн КУО/г абсолютно сухого ґрунту.

Композиція РизобінК + *Bacillus megaterium* УКМ В-5724 характеризувалася вираженою сортоспецифічною ефективністю у сорту сої Монарх, забезпечивши формування 47 бульбочок загальною масою 1,43 г, а у сорту

Софія – максимальну чисельність целюлозоруйнівних мікроорганізмів у шарі ґрунту 0–20 см наприкінці досліджуваного періоду (3,46 млн КУО/г). Поєднання обробки насіння сої РизобіномК із *Pseudomonas sp.* 6 стабільно перевищувало контроль (без обробки насіння) за показниками бульбочкоутворення, однак поступалося композиціям із *Bacillus* за сукупністю досліджених ознак.

Встановлено сортову специфічність реакції на інокуляцію: сорт сої Монарх формував більші показники кількості і маси бульбочок у фазу утворення бобів, тоді як сорт Софія характеризувався вищим відносним приростом маси бульбочок порівняно з контролем. Для умов Півдня України доцільним є використання композиції РизобінК + *B. velezensis* IMB B-8134 як найбільш перспективного елемента біологізованої технології вирощування обох сортів сої.

Список використаних джерел

1. Вожегова Р. А., Боровик В. О., Рубцов Д. К., Біднина І. О., Клубук В. В. Сучасні аспекти вирішення проблеми економії азотних добрив під час вирощування сої в умовах зрошення. *Аграрні інновації*. 2020. № 1. С. 11–16. DOI: 10.32848/agrar.innov.2020.1.2
2. Ушкаренко В. О., Вожегова Р. А., Голобородько С. П., Коковіхін С. В. Методика польового досліду (зрошуване землеробство) : навчальний посібник. Херсон : Грінь Д. С., 2014. 445 с.
3. Barbosa J. Z., Hungria M., Sena J. V. S., Poggere G. C., Reis A. R. dos, Corrêa R. S. Meta-analysis reveals benefits of co-inoculation of soybean with Azospirillum brasilense and Bradyrhizobium spp. in Brazil. *Applied Soil Ecology*. 2021. Vol. 163. Art. 103913. DOI: 10.1016/j.apsoil.2021.103913.
4. Hnini M., Aurag J. Prevalence, diversity and applications potential of nodules endophytic bacteria: a systematic review. *Frontiers in Microbiology.* 2024. Vol. 15. Art. 1386742. DOI: 10.3389/fmicb.2024.1386742.
5. Kumawat K. C., Singh I., Nagpal S., Sharma P., Gupta R. K., Sirari A. Co-inoculation of indigenous Pseudomonas oryzihabitans and Bradyrhizobium sp. modulates the growth, symbiotic efficacy, nutrient acquisition, and grain yield of soybean. Pedosphere. 2022. Vol. 32, No. 3. P. 438–451. DOI: 10.1016/S1002-0160(21)60085-1.
6. Marchão R. L., Silva G. C. da, Andrade S. R. M. de, Reis Junior F. B. dos, Barros Júnior M. P. de, Haphonsso R. H., Carvalho A. M. de. Improving Soybean Development and Grain Yield by Complementary Inoculation with Growth-Promoting Bacteria Azospirillum, Pseudomonas, Priestia, and Bacillus. *Plants.* 2025. Vol. 14, No. 3. Art. 402. DOI: 10.3390/plants14030402.
7. Nakei M. D., Venkataramana P. B., Ndakidemi P. A. Soybean-Nodulating Rhizobia: Ecology, Characterization, Diversity, and Growth Promoting Functions. *Frontiers in Sustainable Food Systems.* 2022. Vol. 6. Art. 824444. DOI: 10.3389/fsufs.2022.824444.
8. Prando A. M., Barbosa J. Z., Oliveira A. B. de, Nogueira M. A., Possamai E. J., Hungria M. Benefits of soybean co-inoculation with Bradyrhizobium spp. and Azospirillum brasilense: Large-scale validation with farmers in Brazil. *European Journal of Agronomy*. 2024. Vol. 155. Art. 127112. DOI: 10.1016/j.eja.2024.127112.
9. Sibponkrung S., Kondo T., Tanaka K., Tittabutr P., Boonkerd N., Yoshida K., Teaumroong N. Co-Inoculation of Bacillus velezensis Strain S141 and Bradyrhizobium Strains Promotes Nodule Growth and Nitrogen Fixation. *Microorganisms*. 2020. Vol. 8, No. 5. Art. 678. DOI: 10.3390/microorganisms8050678.
10. Szczerba A., Płażek A., Kopeć P., Wójcik-Jagła M., Dubert F. Effect of different Bradyrhizobium japonicum inoculants on physiological and agronomic traits of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) associated with different expression of nodulation genes. *BMC Plant Biology.* 2024. Vol. 24. Art. 1201. DOI: 10.1186/s12870-024-05911-x.
11. Tu T.-C., Lin S.-H., Shen F.-T. Enhancing Symbiotic Nitrogen Fixation and Soybean Growth through Co-Inoculation with Bradyrhizobium and Pseudomonas Isolates. *Sustainability.* 2021. Vol. 13, No. 20. Art. 11539. DOI: 10.3390/su132011539.
12. Xing P., Zhao Y., Guan D., Li L., Zhao B., Ma M., Jiang X., Tian C., Cao F., Li J. Effects of Bradyrhizobium Co-Inoculated with Bacillus and Paenibacillus on the Structure and Functional Genes of Soybean Rhizobacteria Community. *Genes.* 2022. Vol. 13, No. 11. Art. 1922. DOI: 10.3390/genes13111922.

Uhrin O. M.
Postgraduate Student,
Institute of Climate-Smart Agriculture of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine
Khlibodarske, Ukraine
E-mail: *aleksandr.ugrin@gmail.com*
ORCID: *0009-0002-0710-5852*

Bidnyna I. O.
Candidate of Agricultural Sciences, Senior Researcher,
Institute of Water Problems and Land Reclamation of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine
Institute of Climate-Smart Agriculture of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine
Khlibodarske, Ukraine
E-mail: *irinabidnina@ukr.net*
ORCID: *0000-0001-8351-2519*

EFFICIENCY OF SYMBIOTIC APPARATUS FUNCTIONING AND CELLULOLYTIC MICROBIOTA ACTIVITY IN SOYBEAN CULTIVARS FOLLOWING ENDOPHYTIC–RHIZOBIAL SEED INOCULATION

Abstract

In Ukraine, the issue of biologization of nitrogen nutrition of soybeans and reduction of mineral fertilizer consumption is the subject of long-term research. However, for the conditions of the Black Sea region of Ukraine, the complex effect of combinations of RhizobinK with B. velezensis IMV B-8134, Pseudomonas sp. 6 and B. megaterium UKM B-5724 on the formation of the nodule

apparatus of varieties of different early maturity and the seasonal dynamics of cellulose-destructive microbiota in different soil layers has not been sufficiently clarified. The aim: to determine the effects of pre-sowing seed inoculation with a rhizobial preparation and its combinations with endophytic bacteria on the formation of the symbiotic apparatus and the abundance of cellulolytic microorganisms in the rhizosphere of soybean cultivars Sofiia and Monarkh. Field experiments were conducted in Kherson Oblast, Ukraine, during 2023–2025. The treatments included an uninoculated control, RhizobinK, and its combinations with Bacillus velezensis IMV B-8134, Pseudomonas sp. 6, and Bacillus megaterium UCM B-5724. The number and fresh weight of nodules were determined at the branching and pod formation stages of soybean development. The abundance of cellulolytic microorganisms was assessed in the 0–20 and 20–40 cm soil layers during three interphase periods. The highest biological efficiency was achieved with the RhizobinK + B. velezensis IMV B-8134 treatment. At the branching stage, this combination promoted the formation of 26–27 nodules with a fresh weight of 0.34–0.39 g per plant, while at the pod formation stage it produced 41–49 nodules with a fresh weight of 1.21–1.45 g per plant. The average abundance of cellulolytic microorganisms under this treatment reached 2.93 million CFU g^{-1} in the rhizosphere of cultivar Sofiia and 2.94 million CFU g^{-1} in cultivar Monarkh, exceeding the control by 6.1% and 11.6%, respectively. The combination with B. megaterium was particularly effective for cultivar Monarkh, resulting in 47 nodules with a total fresh weight of 1.43 g per plant. Co-inoculation with rhizobial and endophytic bacteria enhanced the development of the soybean symbiotic apparatus and increased the biological activity of the rhizosphere. The RhizobinK + B. velezensis IMV B-8134 combination was identified as the most effective treatment for both soybean cultivars studied.

Key words: *soybean cultivars, pre-sowing inoculation, endophytic bacteria, root nodules, cellulose-degrading microorganisms.*

References

1. Vozhehova, R. A., Borovyk, V. O., Rubtsov, D. K., Bidnyna, I. O., & Klubuk, V. V. (2020). Suchasni aspekty vyrishennia problemy ekonomii azotnykh dobryv pid chas vyroshchuvannia soi v umovakh zroshennia [Modern aspects of solving the problem of nitrogen fertilizer saving in irrigated soybean cultivation]. *Agrarian Innovations,* 1, 11–16. https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2020.1.2 [in Ukrainian].

2. Ushkarenko, V. O., Vozhehova, R. A., Holoborodko, S. P., & Kokovikhin, S. V. (2014). *Metodyka polovoho doslidu (zroshuvane zemlerobstvo) [Methods of field experiment (irrigated agriculture)].* Kherson: Hrin D. S., 445 [in Ukrainian].

3. Barbosa, J. Z., Hungria, M., Sena, J. V. S., Poggere, G. C., dos Reis, A. R., & Corrêa, R. S. (2021). Meta-analysis reveals benefits of co-inoculation of soybean with Azospirillum brasilense and Bradyrhizobium spp. in Brazil. *Applied Soil Ecology,* 163, 103913. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.103913 [in English].

4. Hnini, M., & Aurag, J. (2024). Prevalence, diversity and applications potential of nodules endophytic bacteria: A systematic review. *Frontiers in Microbiology, 15,* 1386742. https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1386742 [in English].

5. Kumawat, K. C., Singh, I., Nagpal, S., Sharma, P., Gupta, R. K., & Sirari, A. (2022). Co-inoculation of indigenous Pseudomonas oryzihabitans and Bradyrhizobium sp. modulates the growth, symbiotic efficacy, nutrient acquisition, and grain yield of soybean. *Pedosphere,* 32(3), 438–451. https://doi.org/10.1016/S1002-0160(21)60085-1 [in English].

6. Marchão, R. L., da Silva, G. C., de Andrade, S. R. M., dos Reis Junior, F. B., de Barros Júnior, M. P., Haphonsso, R. H., & de Carvalho, A. M. (2025). Improving soybean development and grain yield by complementary inoculation with growth-promoting bacteria Azospirillum, Pseudomonas, Priestia, and Bacillus. *Plants,* 14(3), 402. https://doi.org/10.3390/plants14030402 [in English].

7. Nakei, M. D., Venkataramana, P. B., & Ndakidemi, P. A. (2022). Soybean-nodulating rhizobia: Ecology, characterization, diversity, and growth promoting functions. *Frontiers in Sustainable Food Systems,* 6, 824444. https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.824444 [in English].

8. Prando, A. M., Barbosa, J. Z., de Oliveira, A. B., Nogueira, M. A., Possamai, E. J., & Hungria, M. (2024). Benefits of soybean co-inoculation with Bradyrhizobium spp. and Azospirillum brasilense: Large-scale validation with farmers in Brazil. *European Journal of Agronomy,* 155, 127112. https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127112 [in English].

9. Sibponkrung, S., Kondo, T., Tanaka, K., Tittabutr, P., Boonkerd, N., Yoshida, K., & Teaumroong, N. (2020). Co-inoculation of Bacillus velezensis strain S141 and Bradyrhizobium strains promotes nodule growth and nitrogen fixation. *Microorganisms,* 8(5), 678. https://doi.org/10.3390/microorganisms8050678 [in English].

10. Szczerba, A., Płażek, A., Kopeć, P., Wójcik-Jagła, M., & Dubert, F. (2024). Effect of different Bradyrhizobium japonicum inoculants on physiological and agronomic traits of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) associated with different expression of nodulation genes. *BMC Plant Biology,* 24, 1201. https://doi.org/10.1186/s12870-024-05911-x [in English].

11. Tu, T.-C., Lin, S.-H., & Shen, F.-T. (2021). Enhancing symbiotic nitrogen fixation and soybean growth through co-inoculation with Bradyrhizobium and Pseudomonas isolates. *Sustainability,* 13(20), 11539. https://doi.org/10.3390/su132011539 [in English].

12. Xing, P., Zhao, Y., Guan, D., Li, L., Zhao, B., Ma, M., Jiang, X., Tian, C., Cao, F., & Li, J. (2022). Effects of Bradyrhizobium co-inoculated with Bacillus and Paenibacillus on the structure and functional genes of soybean rhizobacteria community. *Genes,* 13(11), 1922. https://doi.org/10.3390/genes13111922 [in English].

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 04.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.10.2026