

Формування симбіотичного потенціалу та врожайності сої під впливом ширини міжряддя та норми висіву насіння

Н. В. Новицька^{1*}, А. В. Лемешик¹, Н. М. Доктор²,
В. Й. Кипила², О. М. Мартинов³

¹Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна, *e-mail: novitska@ukr.net

²ВСП «Мукачівський фаховий коледж НУБіП України», вул. Т. Масарика, 32, м. Мукачеве, Закарпатська обл., 89600, Україна

³Український інститут експертизи сортів рослин, вул. Горіхуватський шлях, 15, м. Київ, 03041, Україна

Мета. Установити особливості формування симбіотичного потенціалу та врожайності сої залежно від ширини міжряддя і норми висіву насіння в умовах Правобережного Лісостепу України. **Методи.** Польові дослідження проводили у 2021–2023 рр. на типовому малогумусному чорноземі за схемою трифакторного дослідження. Вивчали сорти сої різних груп стиглості ('Жаклін', 'Сіселія', 'Сайдіна', 'Вишиванка') за трьох способів сівби (19 см, 19 + 38 см, 38 см) та норм висіву 450, 600 і 750 тис. шт./га. Методом Г. С. Посипанова встановлювали кількість і масу активних бульбочок, тривалість симбіозу та активний симбіотичний потенціал посівів. Урожайність обліковували подільською з перерахунком на стандартну вологість та чистоту насіння. **Результати.** Ширина міжряддя 19 + 38 см сприяла збільшенню кількості активних бульбочок. Вона становила 39,0 і 38,9 шт. на рослину в сортів 'Сіселія' та 'Сайдіна' та 36,9 і 36,7 шт. – у 'Вишиванки' та 'Жаклін' за норми висіву 450 тис. насінин/га. Найвищий симбіотичний потенціал спостерігали за стрічковою сівби (міжряддя – 19 + 38 см). Максимальні показники було зафіксовано в 'Сіселії' – 10,24 кг-діб/га (600–750 тис. шт./га), 'Сайдіні' – 10,11 кг-діб/га (450 тис. шт./га), 'Вишиванки' – 10,07 кг-діб/га (600 тис. шт./га), 'Жаклін' – 10,02 кг-діб/га (450 тис. шт./га). Найбільша врожайність сорту 'Сіселія' становила 2,92 т/га, 'Сайдіна' – 2,82 т/га, 'Вишиванка' – 2,74 т/га, 'Жаклін' – 2,72 т/га. Усі вони досягли таких значень за стрічкового способу сівби з міжряддям 19 + 38 см. Утім норма висіву була різною: 750 тис. шт./га – в 'Сіселії' та 'Жаклін', 600 тис. шт./га – у 'Вишиванки', 450 тис. шт./га – в 'Сайдіні'. **Висновки.** Стрічкова сівба з міжряддям 19 + 38 см та нормою висіву 600–750 тис. шт./га сприяла підвищенню кількості активних колоній бульбочкових бактерій і симбіотичного потенціалу посівів сої. Максимальну врожайність сортів одержано завдяки тим самим способу сівби та ширині міжряддя, проте за різної норми висіву. Для 'Сіселії' та 'Жаклін' вона становила 750 тис. насінин/га, для 'Вишиванки' й 'Сайдіні' – 600 та 450 тис. насінин/га відповідно.

Ключові слова: соя; сорт; спосіб сівби; кількість насінин на одиницю площі; кількість активних бульбочок; маса активних бульбочок; урожайність.

Вступ

Соя [*Glycine max* (L.) Merr.] є однією зі стратегічних бобових культур, які вирощують у 95 країнах світу. Вона посідає четверте місце після пшениці, рису та кукурудзи за посівними площами [1, 2]. Останні впродовж 2015–2024 рр. істотно зросли й у структурі вітчизняного виробництва – від 2,08 до 2,42 млн га, а рівень урожайності збільшився до 2,60 т/га [3].

Формуванню значного рівня врожайності сої сприяє засвоєння нею до 450 кг/га біологічного азоту завдяки симбіотичній (біологічній) фіксації атмосферного. Висока активність цього процесу зумовлена низкою агро-технологічних чинників, серед яких ключову роль відіграють вибір сорту, норма висіву насіння, строки сівби, удобрення та захист рослин [4, 5]. Різні комбінації норм висіву та ширини міжряддя дають змогу регулювати показники симбіотичної продуктивності, створювати ліпші умови для розвитку сої та формування вищої врожайності [6]. Встановлено, що приріст кількості та маси бульбочок на коренях із підвищенням норми висіву ставав дедалі меншим через скорочення площі живлення рослин унаслідок їхнього ущільнення в рядках і збільшення міжряддя. Якщо ширина останніх становила 19 см, формувалася максимальна чисельність бульбочок із вищою масою на коренях десяти рослин, а от за 45 см відбувалося суттєве зниження цих по-

Nataliia Novytska
<https://orcid.org/0000-0002-7645-4151>

Anna Lemeszyk
<https://orcid.org/0009-0007-8696-5610>

Natalii Doctor
<https://orcid.org/0000-0002-8887-898X>

Valentyna Kypyla
<https://orcid.org/0000-0002-8887-898X>

Oleksii Martynov
<https://orcid.org/0000-0001-7680-7490>



© The Author(s) 2025. Published by Ukrainian Institute for Plant Variety Examination. This is an open access article distributed under the terms of the license CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

казників. Їхній приріст також поступово зменшувався зі збільшенням норми висіву від 800 до 1200 тис. шт./га [7, 8].

Учені [9] виявили, що зі збільшенням норми висіву з 500 до 800 тис. шт./га кількість загальних та активних бульбочок на коренях однієї рослини сої 'Устя' зменшувалася. Так, у фазі повної бутонізації – на 7,4 та 5,8 шт. відповідно, повного цвітіння – на 10,1 та 9,8 шт., збиральної стиглості – на 6,0 і 2,7 шт. відповідно. Підвищення норми з 300 до 700 тис. шт./га спричиняло зниження кількості та маси бульбочок на коренях окремої рослини, втім їхні загальні показники на гектарі зростали завдяки ущільненню посівів [10]. На відміну від сої, інша бобова культура – квасоля звичайна – за широкорядної сівби (ширина міжрядь – 45 см) формувала активний симбіотичний апарат. Найбільшим він був у сорту 'Біла Білосніжка' – 16,3–21,6 шт./рослину активних бульбочок із масою 0,29–0,38 г/рослину [11].

Корегуючи норму висіву та ширину міжрядь, можна ефективно впливати на симбіотичну продуктивність рослин сої, створюючи сприятливі умови для їхнього росту та розвитку та забезпечуючи формування вищої врожайності. На основі кореляційно-регресійного аналізу дослідниками [12] встановлено сильні зворотні зв'язки між кількістю активних бульбочкових бактерій ($r = -0,713$), їхньою масою ($r = -0,649$), активним симбіотичним потенціалом ($r = -0,714$) і шириною міжрядь.

Загалом розширені міжряддя (понад 19 см) можуть шкодити симбіозу, оскільки загущення посівів спричиняє пригнічення фотосинтезу та зниження кількості стеблових вузлів на рослині [13, 14]. Зменшення міжрядної відстані та збільшення норми висіву позитивно впливає на структуру врожайності, сприяє зростанню чисельності та сухої маси кореневих бульбочок, а також поліпшує показники флуоресценції хлорофілу. Водночас загущення посівів призводить до протилежного ефекту [15].

Мета досліджень – установити вплив ширини міжрядь і норми висіву на особливості формування симбіотичного потенціалу та врожайності сої в умовах Правобережного Лісостепу України.

Матеріали та методика досліджень

Дослідження проводили протягом 2021–2023 рр. на полях відокремленого підрозділу НУБіП України «Агрономічна дослідна станція». Ґрунт дослідного поля – чорнозем типовий малогумусний. Уміст гумусу в орному шарі (за Тюрнімом) – 4,39–4,53%; pH сольової

витяжки – 6,9–7,3; ємність поглинання – 30,7–32,0 мг-екв на 100 г ґрунту. Уміст легкогидролізованого азоту – 100–101 мг/кг ґрунту, мінерального (нітратний, амонійний) – 20–30 мг/кг, обмінного фосфору – 33–34 мг/кг, обмінного калію – 98–103 мг/кг ґрунту, що відповідає середньому рівню забезпеченості орних ґрунтів основними елементами живлення.

Метеорологічні умови років проведення досліджень характеризувалися істотною варіабельністю за основними погодними показниками. Зокрема, вегетаційний цикл 2021 року відзначився нерівномірним зволоженням, а 2022-го – стійким дефіцитом опадів та істотним перевищенням температурного режиму впродовж весняно-літнього періоду, що посилювало прояв ґрунтової та повітряної посухи й негативно впливало на розвиток кореневої системи та формування симбіотичного потенціалу сої. Погодні умови 2023 року були найбільш сприятливими для вирощування культури, активного утворення бульбочок та одержання високої врожайності.

Дослідження виконували за схемою трифакторного польового дослідження (табл. 1). Загальна площа ділянки становила 84 м², облікова – 52,8 м², повторність дослідження чотириразова.

Таблиця 1

Схема дослідження

Фактор А – сорт	Фактор В – ширина міжряддя, см	Фактор С – норма висіву насіння, тис. шт./га
'Жаклін' (ранньостиглий)		
'Сірелія' (середньоранній)	19	450
'Сайдіна' (середньостиглий)	19 + 38	600
'Вишиванка' (середньостиглий)	38	750

Вивчали чотири сорти сої, внесені до Державного реєстру сортів рослин, придатних для поширення в Україні, та рекомендовані до вирощування у зоні Лісостепу. А саме: 'Сайдіна' (зареєстрований у 2017 р.) та 'Сірелія' (2019 р.) – іноземної селекції від компанії RAGT (Франція); 'Вишиванка' (2019 р.) та 'Жаклін' (2020 р.) – вітчизняної селекції, оригінатори – ННЦ «Інститут землеробства НААН», СП «Інтерагро Сквіра».

Технологія вирощування сої – загальноприйнята для ґрунтово-кліматичної зони проведення досліджень. Попередник – ячмінь ярий. Система удобрення культури передбачала внесення 100 кг/га нітроамофоски (N₁₆P₁₆K₁₆). Обробку насіння інокулянтном Хістік Соя (BASF), що містить у своєму складі штам бульбочкових бактерій *Bradyrhizobium* 532с, у нормі 400 г препарату на 120 кг на-

сіння проводили в день сівби. Її розпочинали, коли температура ґрунту на глибині загортання насіння становила 10–12 °С, сівалкою Great Plains на кінцеву густоту. Збирання та облік урожаю виконували за повної стиглості рослин (ВВСН 99), подільською, комбайном «Sampro-130».

Добір проб для визначення розмірів симбіотичного апарату здійснювали методом монолітів у міжфазний період активного функціонування симбіотичного потенціалу (від початку цвітіння до формування й наливу бобів) [17–20]. Кількість та масу активних бульбочок і тривалість активного симбіозу встановлювали методом Г. С. Посипанова (1991), з подальшою біометрією на 50 рослинах із кожного варіанту дослідження. Активний симбіотичний потенціал (АСП) посівів сої обчислювали за формулою:

$$\text{АСП} = M_{\text{акт}} \times T,$$

де $M_{\text{акт}}$ – маса активних бульбочок, г/рослину; T – тривалість функціонування симбіозу, діб.

Отримане значення перераховували на одиницю площі:

$$\text{СА} = \text{АСП} \times N,$$

де N – кількість рослин на 1 га, і виражали в кг • діб/га.

Урожай обліковували подільською з перерахунком на стандартну вологість та повну чистоту зерна. Статистичний аналіз результатів досліджень виконували, використовуючи програму Statistica 10 [21].

Результати досліджень

До фази завершення цвітіння спостерігали найінтенсивніше наростання активних (рожевих) бульбочок. На пізніх стадіях росту та розвитку сої кількість і маса бульбочок різко знижувалися через уповільнення процесів транслокації асимілятів до них і коренів із листків та послаблення здатності до перемі-

щення фотоасимілятів [8–10]. За результатами проведених у 2021–2023 рр. досліджень встановлено, що сортові особливості, ширина міжрядь та норма висіву істотно впливали на формування чисельності активних бульбочок. Вона варіювала в межах 30,0–39,0 шт. на рослину, а маса становила 0,65–0,69 г. Це свідчить про достатній рівень функціональної активності симбіотичного апарату в усіх варіантах дослідження.

Найсприятливіші умови для формування активних бульбочок склалися за стрічкового способу сівби з міжряддям 19 + 38 см. Така схема просторового розміщення рослин та норма висіву 450 тис. шт./га зумовили формування максимальних значень вказаного показника у сортів 'Сірелія' та 'Сайдіна' (39,0 та 38,9 шт. на рослину) та дещо нижчих – у 'Вишиванки' й 'Жаклін' (36,9 та 36,7 шт.) (табл. 2).

Кількість активних бульбочок за рядкового способу сівби з міжряддям 19 см була трохи меншою, ніж за стрічкового з комбінованим варіантом міжрядь (19 + 38 см), але більшою, порівнюючи з широкорядним способом. Так, норма висіву 450 тис. шт./га забезпечувала формування 38 активних бульбочок у сортів 'Сірелія' й 'Сайдіна' та 35,0–36,0 – у 'Вишиванки' й 'Жаклін'. Найменші значення цього показника зафіксовано за ширини міжрядь 38 см – 30,0–35,9 шт. на рослину залежно від сорту та норми висіву. Водночас чітко виражену тенденцію до зниження кількості бульбочок спостерігали за підвищення норми висіву для будь-якого з культиварів до 750 тис. шт./га.

Отримані результати підтверджують, що ефективність симбіотичної азотфіксації сої значною мірою визначається просторовою організацією посіву та щільністю стояння рослин. Згідно з [22, 23], якщо їхнє розміщення забезпечує рівномірний розвиток кореневої системи та послаблює конкуренцію за асиміляти, формуються оптимальні умови для роз-

Таблиця 2

Кількість та маса активних бульбочок у сортів сої під час фази цвітіння залежно від ширини міжрядь та норми висіву (середнє за 2021–2023 рр.)

Ширина міжрядь, см	Норма висіву насіння, тис. шт./га	Сорт							
		'Жаклін'		'Сірелія'		'Сайдіна'		'Вишиванка'	
		1	2	1	2	1	2	1	2
19	450	35,0	0,66	38,0	0,67	38,0	0,68	36,0	0,66
	600	37,1	0,67	37,8	0,68	37,0	0,67	35,1	0,68
	750	34,0	0,68	34,6	0,68	35,1	0,67	32,0	0,66
19 + 38	450	36,7	0,67	39,0	0,68	38,9	0,69	36,9	0,67
	600	36,0	0,67	38,2	0,69	38,1	0,68	36,1	0,68
	750	35,0	0,68	37,2	0,69	35,9	0,67	33,9	0,66
38	450	32,9	0,65	35,9	0,65	34,9	0,67	34,1	0,65
	600	31,0	0,66	34,1	0,66	33,0	0,67	32,1	0,66
	750	30,0	0,67	33,0	0,66	30,9	0,66	30,0	0,65
H _P 0,05		для 1, шт.: сорту – 1,1; ширини – 1,2; норми – 1,6; загальна – 1,4 для 2, г: сорту – 0,02; ширини – 0,01; норми – 0,01; загальна – 0,05							

Примітка. 1 – кількість активних бульбочок, шт.; 2 – маса активних бульбочок, г.

витку бульбочкових бактерій. Встановлена у цій роботі перевага стрічкового способу сівби з міжряддям 19 + 38 см узгоджується з даними інших досліджень [24], які свідчать, що ліпший аерації ґрунту, інтенсивнішому росту коренів і підвищенню активності ризобіального симбіозу сприяє поєднання вузьких і ширших міжрядь. Водночас їхнє надмірне розширення до 38 см може бути причиною зниження щільності кореневого шару та менш ефективного використання ґрунтового простору, що також підтверджено в нашій публікації.

Виявлено тенденцію до зменшення кількості активних бульбочок зі збільшенням чисельності рослин на одиницю площі. Це узгоджується з даними [25, 26], які пов'язують вказане явище з обмеженням постачання вуглеводів до бульбочок за умов посиленої міжрослинної конкуренції. Зниження фотосинтетичної активності окремої рослини за загущення посівів негативно впливає на енергозабезпечення процесу біологічної фіксації азоту.

Відомості про генетичну детермінованість симбіотичної активності сої підтверджуються зафіксованими в досліді сортовими відмінностями. Вони, згідно з [27, 28], полягають у різній здатності до утворення ефективного симбіозу з бульбочковими бактеріями. Це зумовлено особливостями кореневих ексудатів, архітектонікою кореневої системи та швидкістю росту рослин на ранніх етапах органогенезу. Вищі показники активного симбіозу в сортів 'Сірелія' та 'Сайдіна' свідчать про потенційно більшу здатність до біологічної азотфіксації.

Період активного функціонування симбіотичного потенціалу сої, коли відбувається інтенсивне азотфіксування бульбочковими бактеріями, триває від початку цвітіння до утворення й наливу бобів, з піком у фазах масового цвітіння та зав'язування бобів. Це є критичним для забезпечення рослини до-

ступним азотом та формування високого врожаю насіння. Саме тоді соя найактивніше співпрацює з ризобіями, засвоюючи атмосферний азот [4].

За результатами досліджень, проведених упродовж 2021–2023 рр., встановлено, що симбіотичний потенціал сортів культури істотно залежить від їхніх особливостей, ширини міжрядь та норми висіву й виражається у кг діб/га. Показник характеризує інтегральну здатність посіву до біологічної фіксації азоту протягом вегетації та відображає сумарну ефективність функціонування симбіотичної системи «рослина – бульбочкові бактерії». Його значення в середньому за роки досліджень у період активного функціонування змінювалися в межах 9,58–10,24 кг діб/га, що свідчить про помірну варіабельність залежно від поєднання чинників, які вивчали. Найвищий симбіотичний потенціал відзначено за стрірковою сівби з шириною міжрядь 19 + 38 см, а саме: 10,24 кг діб/га (за норми 600–750 тис. шт./га) – у сорту 'Сірелія'; 10,11 кг діб/га (за 450 тис. шт./га) – у сорту 'Сайдіна'; 10,07 кг діб/га (за 600 тис. шт./га) – у 'Вишиванки'; 10,02 кг діб/га (за норми 450 тис. шт./га) – у 'Жаклін' (табл. 3).

За рядкового способу сівби з міжряддям 19 см симбіотичний потенціал був дещо нижчим, ніж за стрічкового, проте стабільно перевищував показники широкорядного. Значення в цьому варіанті дослідів змінювалися в межах 9,71–10,08 кг діб/га, а тенденцію до їхнього зростання спостерігали з підвищенням норми висіву до 600–750 тис. шт./га для більшості досліджуваних сортів.

Найнижчий симбіотичний потенціал – 9,58–9,85 кг • діб/га залежно від сорту та норми висіву – зафіксовано за міжряддям 38 см. Таке надмірне розширення менше сприяло формуванню та тривалому функціонуванню бульбочкового апарату. Також відмічено вплив норми висіву на вказаний показник.

Таблиця 3

Симбіотичний потенціал сортів сої у період його активного функціонування залежно від ширини міжрядь та норми висіву, кг • діб/га (середнє за 2021–2023 рр.)

Ширина міжрядь, см	Норма висіву насіння, тис. шт./га	Сорт			
		'Сірелія'	'Сайдіна'	'Вишиванка'	'Жаклін'
19	450	9,87	9,96	9,72	9,71
	600	10,04	9,93	9,97	9,85
	750	10,08	9,93	9,74	10,01
19+38	450	9,97	10,11	9,78	9,84
	600	10,24	10,09	10,07	9,92
	750	10,24	9,91	9,73	10,02
38	450	9,58	9,85	9,60	9,58
	600	9,70	9,81	9,75	9,70
	750	9,69	9,67	9,58	9,83
НІР _{0,05}		для сорту – 0,07; ширини – 0,08; норми – 0,20; загальна – 0,11			

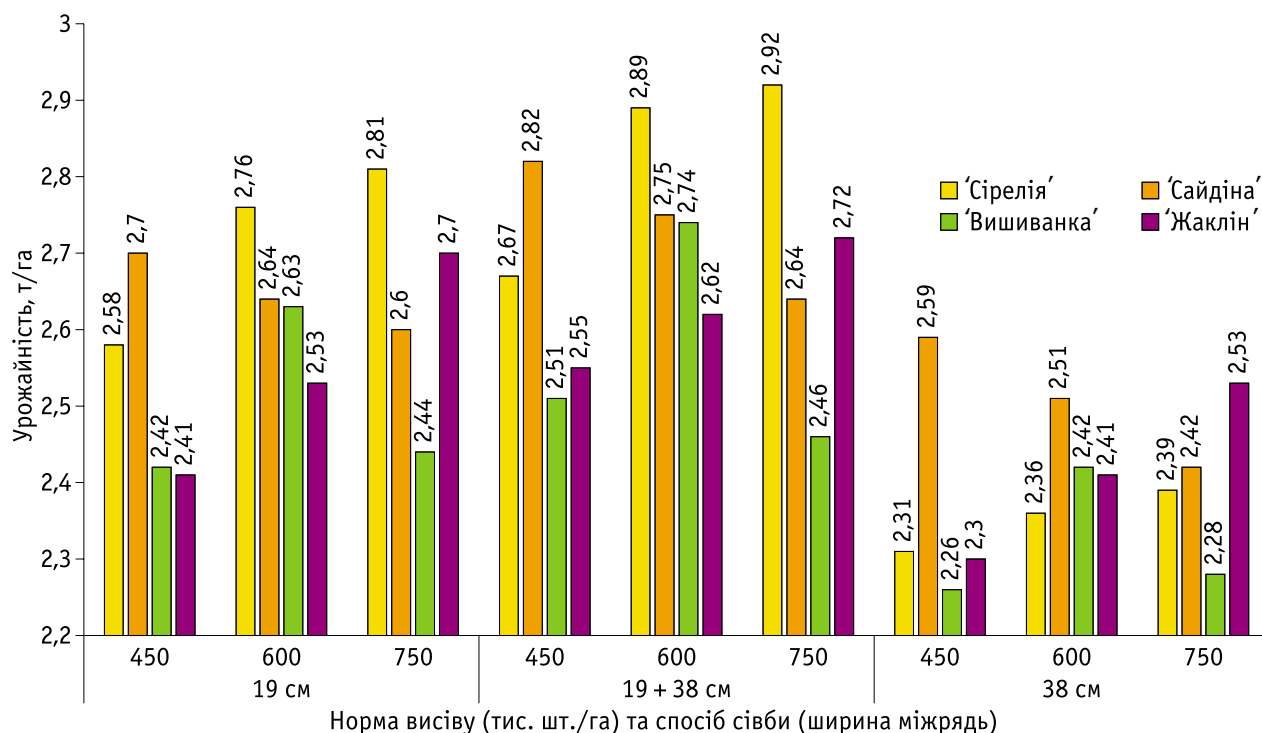
Зокрема, за 600 тис. шт./га фіксували його максимальні або близькі до максимальних значення, тоді як подальше загущення до 750 тис. шт./га не забезпечувало істотного приросту, а в окремих варіантах призводило до стабілізації чи незначного зниження. Сортові відмінності були чітко вираженими. Так, вищим рівнем симбіотичного потенціалу в усіх варіантах дослідження характеризувалися 'Сірелія' та 'Сайдіна', дещо нижчим – 'Вишиванка' й 'Жаклін'.

Отримані результати підтверджують сучасні уявлення про те, що симбіотичний потенціал сої є інтегральним показником, який відображає кількість і масу бульбочок, тривалість та інтенсивність їхнього функціонування впродовж вегетації, а також, за даними [26, 29], найбільш достовірно характеризує реальний вплив біологічної фіксації азоту на азотний баланс агроценозу. Встановлена нами перевага комбінованого варіанту міжрядь (19 + 38 см) за стрічкового способу сівби узгоджується з результатами інших досліджень [30], в яких зазначено, що оптимальна просторова структура посіву допомагає рівномірному розвитку кореневої системи, поліпшує аерацію ґрунту та створює сприятливі умови для пролонгованої активності бульбочкових бактерій. Це своєю чергою забезпечує вищі інтегральні значення симбіотичного потенціалу.

Зниження симбіотичного потенціалу за ширококорядного способу сівби (38 см) може бути пов'язане з менш ефективним викорис-

танням ґрунтового простору та неоднорідним розвитком кореневої системи, що обмежує тривалість активної азотфіксації. Схожі закономірності наведено у працях [31, 32], де підкреслено важливість оптимального поєднання щільності стояння рослин і ширини міжрядь для підтримання симбіотичної активності. Також виявлений оптимум симбіотичного потенціалу за норми висіву 600 тис. шт./га узгоджується з даними іноземних вчених [33, 34], які вказують, що надмірне загущення посівів призводить до конкуренції за фотоасиміляти, необхідні для енергозабезпечення процесу азотфіксації, тоді як занадто розріджені не забезпечують достатньої сумарної симбіотичної активності на одиницю площі.

Відомо, що від забезпеченості рослин біологічно фіксованим азотом під час критичних фаз органогенезу (бутонізації, цвітіння та наливу насіння) значною мірою залежить урожайність сої. Стабільно більшою, як показав порівняльний аналіз, вона була у варіантах із вищим симбіотичним потенціалом (рис.). Це підтвердило визначальну роль симбіотичної азотфіксації в системі живлення культури. Особливо чітко такий зв'язок простежувався в сортів 'Сірелія' та 'Сайдіна'. Вони поєднували значну інтенсивність бульбочкоутворення, підвищений симбіотичний потенціал та ліпшу реалізацію врожайного потенціалу. Водночас у варіантах зі зниженим симбіотичним потенціалом, спричиненим або надмірним



НІР_{0,05} сорту – 0,31 т/га; ширини – 0,08 т/га; норми – 0,12 т/га; загальна – 0,14 т/га

Рис. Урожайність сортів сої залежно від ширини міжрядь та норми висіву, т/га (середнє за 2021–2023 рр.)

розширенням міжрядь, або загущенням посівів, спостерігали зменшення врожайності.

Оптимальне поєднання ширини міжрядь (19 + 38 см) та норми висіву (450–600 тис. шт./га) забезпечує інтенсивний розвиток кореневої системи й утворення максимальної кількості активних бульбочок. Це своєю чергою зумовлює формування підвищеного симбіотичного потенціалу (кг діб/га) впродовж вегетації, який сприяє повноцінному одержанню рослинами біологічно фіксованого азоту у критичні фази органогенезу, що збільшує врожайність сої.

За ширини міжрядь 19 см середньоранній сорт 'Сирелія' мав урожайність на рівні 2,72 т/га, середньостиглий 'Сайдіна' й 'Вишиванка' – 2,65 та 2,49 т/га, ранньостиглий сорт 'Жаклін' – 2,55 т/га. Достовірно підвищення показника, а саме: на 0,11 т/га – в 'Сирелії', на 0,09 т/га – в 'Сайдіні', на 0,08 т/га – у 'Вишиванки', на 0,08 т/га – у 'Жаклін', у більшості випадків забезпечив стрічковий спосіб сівби з міжряддям 19 + 38 см. Утім розширення до 38 см спричинило зниження врожайності всіх сортів на 0,36; 0,14; 0,17 та 0,13 т/га відповідно.

Норма висіву також впливала на рівень урожайності. Якщо вона становила 450 тис. шт./га, то сорт 'Сирелія' формувал 2,52 т/га врожаю, 'Сайдіна' – 2,70, 'Вишиванка' – 2,40, а 'Жаклін' – 2,42 т/га. Зі збільшенням норми до 600 тис. шт./га зростання показника спостерігали в 'Сирелії', 'Вишиванки' та 'Жаклін' – на 0,16; 0,20 та 0,10 т/га відповідно, а зниження – на 0,07 т/га – в 'Сайдіні'.

Середньоранній сорт 'Сирелія' сформував найвищу врожайність (2,92 т/га) за стрічкової сівби із шириною міжрядь 19 + 38 см та норми висіву 750 тис. шт./га. Це максимальний показник з-поміж усіх у досліді. Середньостиглий сорт 'Сайдіна' був єдиним, який продемонстрував значну продуктивність за відносно низької – 450 тис. шт./га – норми висіву. Вона разом зі стрічковим способом сівби сприяла одержанню найбільшої для цього культувару врожайності – 2,82 т/га.

Оптимальними для максимальної реалізації біологічного потенціалу середньостиглого сорту 'Вишиванка' були ширина міжрядь 19 + 38 см та норма висіву 600 тис. шт./га. Ці умови забезпечили формування врожайності на рівні 2,74 т/га. Найвищого показника для ранньостиглого сорту 'Жаклін' – 2,72 т/га – було досягнуто за стрічкового способу сівби та норми висіву 750 тис. шт./га. Також ефективною для нього виявилася ширина міжрядь 19 см (за тієї самої норми), яка сприяла одержанню 2,70 т/га врожаю.

Урожайність сортів 'Жаклін' (ранньостиглий) та 'Сирелія' (середньоранній) із підвищен-

ням норми висіву до 750 тис. шт./га за досліджуваних способів сівби достовірно зростала завдяки збільшенню кількості рослин на одиницю площі. Втім подальше надмірне підвищення чисельності висіяного насіння до 800–900 тис. шт./га може виявитися негативним, оскільки призведе до загущення посівів, сильної конкуренції рослин за світло, вологу та поживні речовини (що спричинить зниження врожайності, особливо на менш родючих ґрунтах та за посушливих умов), затінення нижніх ярусів і сприятиме розвитку хвороб [35].

Проведений кореляційний аналіз дав змогу встановити тісний позитивний зв'язок між кількістю активних бульбочок і симбіотичним потенціалом ($r = 0,62$). Це означає, що інтенсивність бульбочкоутворення є важливою передумовою формування інтегральної азотфіксувальної здатності посіву сої (табл. 4). Водночас такий зв'язок не є абсолютним, оскільки симбіотичний потенціал визначається не лише кількістю бульбочок, а й тривалістю та інтенсивністю їхнього функціонування.

Таблиця 4

Кореляція між показниками симбіотичної продуктивності та врожайністю сої (середнє за 2021–2023 рр.)

Показник*	Симбіотичний потенціал	Урожайність
Кількість активних бульбочок	0,62	0,62
Симбіотичний потенціал	–	0,99

Примітка. Значення коефіцієнтів кореляції $r \geq 0,60$ відповідають тісному зв'язку, $r \geq 0,90$ – дуже тісному (майже функціональному). За обсягом вибірки зв'язки є статистично достовірними ($p \leq 0,05$).

Виявлена тісна позитивна кореляція ($r = 0,62$) між кількістю активних бульбочок і врожайністю підтверджує значущість морфологічних ознак симбіозу для формування продуктивності сої, проте за силою поступається зв'язку між симбіотичним потенціалом і врожайністю. Він є надзвичайно тісним ($r = 0,99$) та свідчить про майже функціональну залежність між зазначеними показниками. Це означає, що симбіотичний потенціал найбільш повно відображає реальний вплив біологічної фіксації азоту на формування врожаю, інтегруючи як морфологічні, так і фізіологічні складники симбіозу.

Отримані результати доводять, що симбіотичний потенціал є ключовим узагальнювальним показником ефективності симбіотичної системи сої, а оптимізація елементів технології вирощування (ширини міжрядь та норми висіву насіння) дає змогу цілеспрямовано керувати процесами біологічної азотфіксації та реалізацією врожайного потенціалу культури.

Висновки

Завдяки оптимальному поєднанню ширини міжрядь (19 + 38 см) та норми висіву (450–600 тис. шт./га) досліджувані сорти сої сформували максимум активних бульбочок (до 38–39 шт. на рослину). Збільшення їхньої кількості та маси зумовило підвищення симбіотичного потенціалу до 10,07–10,24 кг діб/га, що свідчить про пролонговану та інтенсивну азотфіксувальну активність посівів. За їхнього загущення до 750 тис. шт./га та ширококорядного способу сівби (38 см) зафіксовано зниження чисельності активних бульбочок і симбіотичного потенціалу до 9,58–9,85 кг діб/га.

Максимальна врожайність сорту ‘Сірелія’ становила 2,92 т/га, ‘Сайдіна’ – 2,82 т/га, ‘Вишиванка’ – 2,74 т/га, ‘Жаклін’ – 2,72 т/га. Усі вони досягли таких значень за стрічкового способу сівби з міжряддям 19 + 38 см. Утім норма висіву була різною: 750 тис. шт./га – в ‘Сірелії’ та ‘Жаклін’, 600 тис. шт./га – у ‘Вишиванки’, 450 тис. шт./га – у ‘Сайдіні’.

Між кількістю активних бульбочок і симбіотичним потенціалом встановлено прямий тісний кореляційний зв’язок, що підтверджує їхню функціональну єдність. Найбільш тісний позитивний зв’язок виявлено між симбіотичним потенціалом та врожайністю сої. Це свідчить про вагомий роль біологічної фіксації азоту у формуванні врожаю.

References

- Mizernykh, D. (2024). Current state and prospects for soybean cultivation in the world and Ukraine. *Foothill and Mountain Agriculture and Stockbreeding*, 76(1), 36–47. [https://doi.org/10.32636/01308521.2024-\(76\)-1-4](https://doi.org/10.32636/01308521.2024-(76)-1-4) [In Ukrainian]
- Korobko, A. A. (2021). Dynamics of soybean production in Ukraine and the world. *Balanced Nature Using*, 4, 125–134. <https://doi.org/10.33730/2310-4678.4.2021.253098> [In Ukrainian]
- Didur, I. M., & Holovanyuk, A. B. (2025). Status and prospects of soybean production in Ukraine. *Agricultural Innovations*, 30, 193–196. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2025.30.27> [In Ukrainian]
- Zabolotnyi, H. M., Mazur, V. A., Tsyhanska, O. I., Didur, I. M., Tsyhanskyi, V. I., & Pansyryeva, H. V. (2020). *Agrobiological principles of soybean cultivation and ways of maximum realization of its productivity*. Vinnytsia National Agrarian University. <http://socrates.vsu.edu.ua/repository/card.php?lang=en&id=27706> [In Ukrainian]
- Zabarna, T. A., & Cheresnyuk, V. V. (2023). Biological nitrogen fixation as a way of increase yield of soy. *Agriculture and Forestry*, 3, 76–91. <https://doi.org/10.37128/2707-5826-2023-3-6> [In Ukrainian]
- Lemeshyk, A. V., & Novytska, N. V. (2024). Formation of yield and seed quality of soybean varieties depending on the nutrition area in the Right Bank Forest Steppe of Ukraine. *Advanced Agrotechnologies*, 12(2). <https://doi.org/10.47414/na.12.2.2024.304338> [In Ukrainian]
- Mikheeva, O. O., Rozhkov, A. O., & Mikheev, V. G. (2020). Nodule number and weight on soybean roots depending on seeding rates and row spacings. *Plant Breeding and Seed Production*, 117, 186–198. <https://doi.org/10.30835/2413-7510.2020.207170> [In Ukrainian]
- Shevnikov, M., Milenko, O., Lotysh, I., Shevnikov, D., & Kostenko, M. (2022). The formation of symbiotic potential and yields of soybean depending on elements of growing technology. *Global Journal of Botanical Science*, 10, 39–45. <https://doi.org/10.12974/2311-858X.2022.10.05>
- Panasyuk, R. M., Lykhochvor, V. V., & Panasyuk, O. V. (2011). The influence of seeding rates on the formation of symbiotic and grain productivity of soybean varieties under conditions of western Forest-Steppe of Ukraine. *Feeds and Feed Production*, 69, 133–140. <https://fri-journal.com/index.php/journal/article/view/916> [In Ukrainian]
- Tkalich, I. D., & Shepilova, T. P. (2010). The influence of sowing methods, sowing rates and bacterial preparations on the formation of nodule bacteria and soybean yield. *Bulletin of the Institute of Grain Economy*, 38, 108–111. http://nbuv.gov.ua/UJRN/bisg_2010_38_25 [In Ukrainian]
- Sinchenko, V., & Furman, P. (2023). Symbiotic productivity and yield of common beans depending on technological methods of cultivation. *Feeds and Feed Production*, 96, 63–71. <https://doi.org/10.31073/kormovyrobnytstvo202396-06> [In Ukrainian]
- Yurchenko, Y., & Chorna, V. (2025). Formation and functioning of the symbiotic apparatus of soybean depending on the sowing method in conditions. *Feeds and Feed Production*, 99, 65–76. <https://doi.org/10.31073/kormovyrobnytstvo202599-06> [In Ukrainian]
- Jańczak-Pieniążek, M., Buczek, J., Bobrecka-Jamro, D., Szpunar-Krok, E., Tobiasz-Salach, R., & Jarecki, W. (2021). Morphophysiology, productivity and quality of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) cv. Merlin in response to row spacing and seeding systems. *Agronomy*, 11(2), Article 403. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020403>
- Yang, J., Peng, X., Ren, J., Yang, X., Zhang, K., Li, Y., & Yong, T. (2025). Optimal interspecific distance maintains soybean yield by promoting canopy–root synergy in a maize–soybean relay strip cropping system. *The Crop Journal*. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2025.10.002>
- Jumrani, K., Bhatia, V. S., Hussain, S., Kataria, S., Yang, X., & Brestic, M. (2024). Effect of shading on leaf anatomical structure, photosynthesis characteristics and chlorophyll fluorescence of soybean (*Glycine max*). *Journal of Agronomy and Crop Science*, 210(6), Article e12783 <https://doi.org/10.1111/jac.12783>
- Taran, V. G., Kalenska, S. M., Novytska, N. V., & Daniliv, P. O. (2018). Stability and plasticity of corn hybrids in depending on fertilizing system and density of plant stand in the right-bank forest-steppe of Ukraine. *Biological Resources and Nature Management*, 10(3–4), 147–156. <https://doi.org/10.31548/bio2018.03.019> [In Ukrainian]
- Rozhkov, A. O., Puzik, V. K., Kalenska, S. M., Puzik, L. M., Popov, S. I., Muzafarov, N. M., Bukhalo, V. Ya., & Kryshchuk, E. A. (2016). *Research work in agronomy. Book 1. Theoretical aspects of research work* (A. O. Rozhkov, Ed.). Maidan. [In Ukrainian]
- Rozhkov, A. O., Puzik, V. K., Kalenska, S. M., Puzik, L. M., Popov, S. I., Muzafarov, N. M., Bukhalo, V. Ya., & Kryshchuk, E. A. (2016). *Research work in agronomy. Book 2. Statistical processing of the results of agronomic research* (A. O. Rozhkov, Ed.). Maidan. [In Ukrainian]
- Volkodav, V. V. (2001). *Methodology of state variety testing of agricultural crops (cereals, cereals and leguminous crops)*. Kyiv. [In Ukrainian]
- Volkodav, V. V. (Ed.). (2000). *Methodology of state variety testing of agricultural structures. 1. General part*. State Commission of Ukraine for testing and protection of plant varieties. [In Ukrainian]
- Prysiazniuk, O. I., Karazhbei, H. M., Leshchuk, N. V., Tsyba, S. V., Mazhuha, K. M., Brovkin, V. V., Symonenko, V. A., & Maslechkin, V. V. (2016). *Statistical analysis of agronomic research data package Statistica 10. Guidelines*. Nilan-Ltd. [In Ukrainian]

22. Graham, P. H., & Vance, C. P. (2003). Legumes: Importance and constraints to greater use. *Plant Physiology*, 131(3), 872–877. <https://doi.org/10.1104/pp.017004>
23. Herridge, D. F., Peoples, M. B., & Boddey, R. M. (2008). Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems. *Plant and Soil*, 311, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9668-3>
24. Hungria, M., Nogueira, M. A., Campos, L. J. M., Menna, P., Brandi, F., & Ramos, Y. G. (2020). Seed pre-inoculation with *Bradyrhizobium* as time-optimizing option for large-scale soybean cropping systems. *Agronomy Journal*, 112(6), 5222–5236. <https://doi.org/10.1002/agj2.20392>
25. Kaschuk, G., Nogueira, M. A., de Luca, M. J., & Hungria, M. (2016). Response of determinate and indeterminate soybean cultivars to basal and topdressing N fertilization compared to sole inoculation with *Bradyrhizobium*. *Field Crops Research*, 195, 21–27. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.05.010>
26. Alves, B., Urquiaga, S., Boddey, R., Dakora, F., Bhattarai, S., Maskey, S. L., Samptet, C., Rerkasem, B., Khan, D., Hauggaard-Nielsen, H., & Jensen, E. (2009). The contributions of nitrogen-fixing crop legumes to the productivity of agricultural systems. *Symbiosis*, 48, 1–17. <https://doi.org/10.1007/BF03179980>
27. Adediran, B. O., Ayo-Vaughan, M. A., Ariyo, O. J., Sakariyawo, O. S., Aremu, C. O., & Ibitoye, D. O. (2023). Genotype by environment interaction in soybean and its implications for crop improvement. *International Journal of Plant & Soil Science*, 35(18), 162–173. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i183280>
28. Sinclair, T. R., & Ghanem, M. E. (2023). Realistic physiological options to increase grain legume yield under drought. *Plants*, 12(17), 31–37. <https://doi.org/10.3390/plants12173137>
29. Carciocchi, W., Schwalbert, R., Andrade, F., Corassa, G., Carter, P., Gaspar, A., Schmidt, J., & Ciampitti, I. (2019). Soybean seed yield response to plant density by yield environment in North America. *Agronomy Journal*, 111(4), 1923–1932. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.10.0635>
30. Ciampitti, I. A., & Salvagiotti, F. (2018). New insights into soybean biological nitrogen fixation. *Agronomy Journal*, 110(4), 1185–1196. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.06.0348>
31. Wang, J. (2025). *Root dynamics and nitrogen interactions in wheat/faba bean mixtures: The effect of nutrient availability, light signaling and relative emergence time* [Doctoral dissertation, Wageningen University and Research]. <https://doi.org/10.18174/677209>
32. Tang, L., Song, J., Cui, Y., Fan, H., & Wang, J. (2025). Research progress on a wide and narrow row cropping system for crops. *Agronomy*, 15(1), Article 248. <https://doi.org/10.3390/agronomy15010248>
33. Gaspar, A. P., Mourtzinis, S., Kyle, D., Galdi, E., Lindsey, L. E., Hamman, W. P., Matcham, E. G., Kandel, H. J., Schmitz, P., Stanley, J. D., Schmidt, J. P., Mueller, D. S., Nafziger, E. D., Ross, J., Carter, P. R., Varenhorst, A. J., Wise, K. A., Ciampitti, I. A., Carciocchi, W. D., ... Conley, S. P. (2020). Defining optimal soybean seeding rates and associated risk across North America. *Agronomy Journal*, 112(3), 2103–2114. <https://doi.org/10.1002/agj2.20203>
34. Hungria, M., Nogueira, M., & Araujo, R. (2015). Soybean seed co-inoculation with *Bradyrhizobium* spp. and *Azospirillum brasilense*: A new biotechnological tool to improve yield and sustainability. *American Journal of Plant Sciences*, 6(6), 811–817. <https://doi.org/10.4236/ajps.2015.66087>
35. Senyk, I. I. (2020). Influence of sowing norm and row of row rows on soybean yield in conditions of Western Forest Steppe. *Plant and Soil Science*, 11(3), 43–50. <https://doi.org/10.31548/agr2020.03.043>

UDC 631.461:631.8:633.34

Novytska, N. V.¹, Lemeshyk, A. V.¹, Doktor, N. M.², Kypyla, V. Y.², & Martynov, O. M.³ (2025). Formation of symbiotic potential and soybean yield under the influence of row spacing and seeding density. *Plant Varieties Studying and Protection*, 21(4), 207–214. <https://doi.org/10.21498/2518-1017.21.4.2025.346237>

¹National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15 Heroiv Oborony St., Kyiv, 03041, Ukraine, *e-mail: novytska@ukr.net

²Separated Structural Unit “Mukachevo Professional College of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine”, 32 T. Masaryka St., Mukachevo, Zakarpattia Region, 89600, Ukraine

³Ukrainian Institute for Plant Variety Examination, 15 Horikhuvatskyi shliakh St., Kyiv, 03041, Ukraine

Purpose. To establish the characteristics of symbiotic potential formation and soybean yield depending on row spacing and seeding rate under the conditions of the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine. **Methods.** Field studies were conducted in 2021–2023 on typical low-humus chernozem following a three-factor experimental design. Soybean varieties of different maturity groups (‘Zharlin’, ‘Sirelia’, ‘Saydina’, ‘Vyshyvanka’) were studied across three sowing methods (19 cm, 19 + 38 cm, 38 cm) and seeding rates of 450, 600, and 750 thousand units/ha. The G. S. Posypanov method was used to determine the number and weight of active nodules, the duration of symbiosis, and the active symbiotic potential of the crops. Yield was recorded per plot and recalculated to standard seed moisture and purity. **Results.** A row spacing of 19 + 38 cm contributed to an increase in the number of active nodules. It amounted to 39.0 and 38.9 units per plant for the ‘Sirelia’ and ‘Saydina’ varieties and 36.9 and 36.7 units for ‘Vyshyvanka’ and ‘Zharlin’ at a seeding rate of 450 thousand seeds/ha. The highest symbiotic potential was observed with band sowing (row spacing – 19 + 38 cm). Maximum values were recorded for ‘Sirelia’ – 10.24 kg-days/ha (600–750 thousand units/ha),

‘Saydina’ – 10.11 kg-days/ha (450 thousand units/ha), ‘Vyshyvanka’ – 10.07 kg-days/ha (600 thousand units/ha), and ‘Zharlin’ – 10.02 kg-days/ha (450 thousand units/ha). The highest yield for the ‘Sirelia’ variety was 2.92 t/ha, ‘Saydina’ – 2.82 t/ha, ‘Vyshyvanka’ – 2.74 t/ha, and ‘Zharlin’ – 2.72 t/ha. All achieved these values using the band sowing method with 19 + 38 cm row spacing. However, the seeding rate differed: 750 thousand units/ha for ‘Sirelia’ and ‘Zharlin’, 600 thousand units/ha for ‘Vyshyvanka’, and 450 thousand units/ha for ‘Saydina’. **Conclusions.** Band sowing with 19 + 38 cm row spacing and a seeding rate of 600–750 thousand units/ha contributed to an increase in the number of active nodule bacteria colonies and the symbiotic potential of soybean crops. Maximum variety yields were obtained using the same sowing method and row spacing, but with different seeding rates. For ‘Sirelia’ and ‘Zharlin’, it was 750 thousand seeds/ha; for ‘Vyshyvanka’ and ‘Saydina’, it was 600 and 450 thousand seeds/ha, respectively.

Keywords: soybean; variety; sowing method; number of seeds per unit area; number of active nodules; weight of active nodules; yield.

Надійшла / Received 06.09.2025
Погоджено до друку / Accepted 24.11.2025