

УДК 633.34:631.51:631.847

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2026.148.3.24>

ФОРМУВАННЯ НОДУЛЯЦІЙНОГО АПАРАТУ ТА АЗОТФІКСУВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ СОЇ ЗА РІЗНОЇ ІНТЕНСИВНОСТІ ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ

Яценко В.В. – д.с.-г.н.,

доцент кафедри рослинництва,

Уманський національний університет

orcid.org/0000-0003-2989-0564

Горбенко В.С. – здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти

(доктор філософії) кафедри рослинництва,

Уманський національний університет

orcid.org/0009-0006-2434-7094

У статті висвітлено результати дослідження впливу різних систем обробітку ґрунту на розвиток нодуляційного апарату та азотфіксувальну здатність середньостиглих сортів сої (*Glycine max* (L.) Merr.) в умовах Лісостепу України. Польовий експеримент у 2024–2025 рр. було закладено за схемою split-plot у чотирикратній повторності на чорноземі опідзоленому важкосуглинкового гранулометричного складу. Досліджували три системи обробітку ґрунту: традиційну (оранка), мінімізовану (mini-till) та стрічкову (strip-till), а також два сорти сої – ЕС Ментор і Паллада. Встановлено, що традиційна система обробітку забезпечувала найвищі показники кількості та маси бульбочок, вмісту леґоглобіну й обсягу фіксованого азоту. Сорт ЕС Ментор формував більшу кількість активних бульбочок (36,4 шт./рослину) та характеризувався вищим рівнем біологічної азотфіксації (111,8 кг/га) порівняно із сортом Паллада (26,83 шт./рослину та 87,0 кг/га відповідно). Перехід до системи mini-till супроводжувався зниженням інтенсивності нодуляції та фіксації азоту на 7–9 %, що пов'язано з погіршенням аерації й ущільненням ґрунту. За strip-till незначивний ефект був менш вираженим: показники симбіотичного потенціалу та вмісту леґоглобіну знижувалися незначною мірою, що свідчить про кращі умови розвитку кореневої системи в зоні рядка. Коефіцієнт варіації кількості бульбочок становив 17–18 %, тоді як маса бульбочок і симбіотичний потенціал характеризувалися нижчою мінливістю (7–9 % і 2–3 % відповідно), що підтверджує їх відносну стабільність. Загалом сорт ЕС Ментор продемонстрував вищу пластичність і продуктивність симбіотичної системи за різних технологій обробітку ґрунту. Отримані результати обґрунтовують доцільність застосування strip-till як адаптивної ресурсозберігаючої альтернативи традиційній оранці з мінімальними втратами азотфіксувального потенціалу сої.

Ключові слова: *Glycine max*, mini-till, strip-till.

Yatsenko V. V., Horbenko V. S. Formation of the nodulation apparatus and nitrogen-fixing capacity of soybean under different tillage intensities

The article presents the results of a study on the influence of different tillage systems on the development of the nodulation apparatus and nitrogen-fixing capacity of mid-maturing soybean varieties (*Glycine max* (L.) Merr.) under the conditions of the Forest-Steppe zone of Ukraine. A field experiment was conducted in 2024–2025 using a split-plot design with four replications on podzolized chernozem with a heavy loam texture. Three tillage systems were investigated: conventional (plowing), minimum tillage (mini-till), and strip-till, along with two soybean varieties – ES Mentor and Pallada. It was established that the conventional tillage system provided the highest values for the number and weight of nodules, leghemoglobin content, and the amount of fixed nitrogen. The ES Mentor variety formed a greater number of active nodules (36.4 per plant) and demonstrated a higher level of biological nitrogen fixation (111.8



© Яценко В.В., Горбенко В.С., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

kg/ha) compared to the Pallada variety (26.83 per plant and 87.0 kg/ha, respectively). Transition to the mini-till system resulted in a 7–9% decrease in nodulation intensity and nitrogen fixation, which was associated with reduced soil aeration and compaction. Under strip-till, the negative effect was less pronounced: the indicators of symbiotic potential and leghemoglobin content decreased only slightly, indicating improved conditions for root system development within the tilled row zone. The coefficient of variation for the number of nodules was 17–18%, while nodule weight and symbiotic potential exhibited lower variability (7–9% and 2–3%, respectively), confirming their relative stability. Overall, the ES Mentor variety demonstrated greater plasticity and productivity of the symbiotic system under different tillage technologies. The obtained results substantiate the feasibility of applying strip-till as an adaptive resource-saving alternative to conventional plowing with minimal losses in the nitrogen-fixing potential of soybean.

Key words: *Glycine max*, mini-till, strip-till.

Постановка проблеми. Соя (*Glycine max* (L.) Merr.) є зернобобовою культурою та найбільшим у світі джерелом рослинного білка. У зв'язку зі зростанням чисельності населення планети та підвищенням попиту на соєві корми для тварин у світових масштабах відбувається розширення посівних площ сої [1, 2]. Соя є однією з найбільш рекомендованих культур у сівозмінах завдяки її позитивному впливу на родючість ґрунту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Перехід до альтернативних систем обробітку ґрунту може позитивно впливати на біологічні, фізичні та хімічні властивості ґрунту, що, у свою чергу, сприяє підвищенню продуктивності сільськогосподарських культур. Поряд із технологічними прийомами, вирішальну роль у формуванні вмісту органічної речовини ґрунту, його структури та родючості відіграють кліматичні, ґрунтові й екологічні умови [3]. Водночас широкий діапазон показників секвестрації вуглецю свідчить про високу залежність цих процесів від конкретних ґрунтово-кліматичних умов і тривалості періоду після зміни системи землеробства [4]. У зв'язку з цим у перші роки переходу до ґрунтозахисних і нульових систем обробітку часто спостерігається зниження врожайності [5].

У країнах Європи ґрунтозахисне землеробство та нульовий обробіток ґрунту поширені значно менше, ніж в інших регіонах світу, і більшість посівів сої тут вирощується за традиційної оранки [6].

Окрім впливу системи обробітку ґрунту на продуктивність сої, істотні відмінності спостерігаються також у складі та динаміці ґрунтової мікробіоти, що безпосередньо впливає на процеси біологічної фіксації азоту [7]. Кількість фіксованого азоту може визначатися різними методами, однак морфологічні та кількісні показники бульбочок часто використовуються як індикатор азотфіксувальної здатності [8, 9]. Повідомляється, що як система, так і глибина обробітку ґрунту впливають на кількість бульбочок, сформованих рослинами сої [10, 11]. Разом із тим у наукових джерелах наведено суперечливі дані: в одних дослідженнях зафіксовано збільшення нодуляції за нульового обробітку з прямою сівою, тоді як в інших – вищу інтенсивність утворення бульбочок за традиційної системи обробітку ґрунту [12, 13].

Мета дослідження. Незважаючи на значну кількість робіт, присвячених впливу систем обробітку ґрунту на ріст і розвиток сої, лише незначна частина з них проведена в умовах клімату Європи, де посівні площі сої стрімко зростають. У зв'язку з цим метою нашого дослідження було визначення впливу різних систем обробітку ґрунту (традиційна – оранка, mini-till і strip-till) на розвиток нодуляційного апарату та азотфіксувальну здатність сортів сої.

Постановка завдання. Польовий експеримент було проведено у 2024–2025 роках на базі навчально-виробничого відділу Уманського національного університету (Умань, Україна). Дослідна ділянка розташована в зоні помірно-континентального клімату.

Польовий експеримент закладено за схемою split-plot у чотирикратній повторності на чорноземі опідзоленому важкосуглинкового гранулометричного складу. першим фактором (фактор А) була система обробітку ґрунту: А – традиційна система; В – мінімізований обробіток (поверхневий, mini-till); С – стрічковий обробіток (strip-till). Другим фактором (фактор В) виступали середньостиглі сорти сої – ЕС Ментор та Паллада.

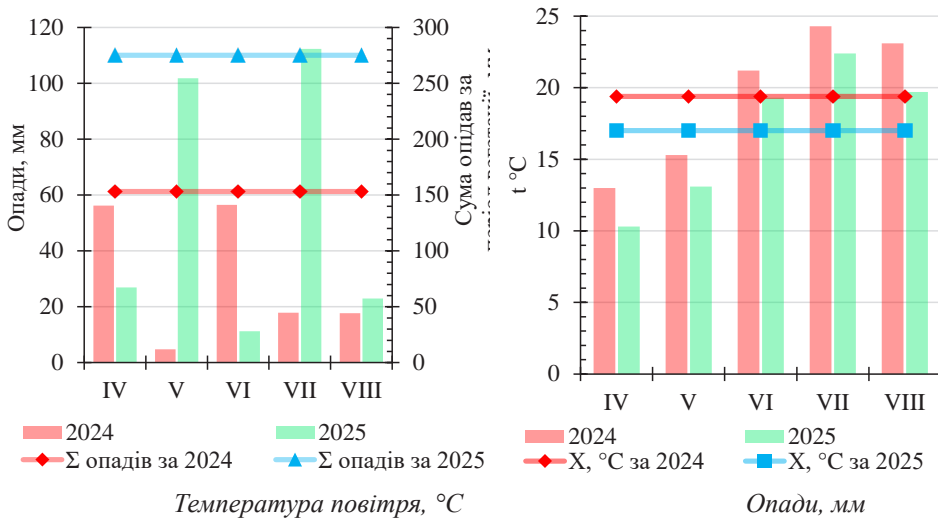


Рис. 1. Кліматичні умови періоду вегетації рослин сої (за даними метеостанцій «Умань»)

Попередником у 2024–2025 рр. було тритікале озиме. Сівбу проводили в оптимальні для зони строки – з 28 квітня по 5 травня. Норма висіву становила 450 тис. схожих насінин на гектар. Технологія вирощування культури відповідала типовим рекомендаціям для умов Лісостепу України. Площа облікової ділянки становила 20 м², площа ділянки збирання – 15 м².

За традиційної та мінімізованої систем обробітку (варіанти А і В) сівбу здійснювали сівалкою Köckerling Ultima (Deutz-Fahr). За технології strip-till (варіант С) висів проводили безпосередньо в стерню із застосуванням сівалки MZURI (VALTRA).

Кількість і масу бульбочок на коренях рослин, а також вміст леглобінину (легтемоглобінину) визначали за загальноприйнятою методикою. Обсяг біологічно фіксованого азоту встановлювали відповідно до методичних підходів Unkovich et al. [14].

Для оцінювання симбіотичної продуктивності використовували показники загального та активного симбіотичного потенціалу (АСП),

Статистичну обробку результатів здійснювали шляхом обчислення середнього арифметичного (\bar{x}) та стандартного відхилення (SD) із використанням програмного забезпечення Microsoft Excel 2019 StatPlus.

Виклад основного матеріалу дослідження. На підставі експериментальних даних 2024–2025 рр. встановлено, що розвиток нодуляційного апарату сої помітно варіював залежно як від сортових особливостей, так і від системи обробітку ґрунту, що підтверджується показниками середніх значень, стандартного відхилення та коефіцієнта варіації.

Зокрема, за традиційної системи обробітку сорт ЕС Ментор формував у середньому 45,5 бульбочок на рослину, з яких 36,4 були активними, тоді як у сорту Паллада ці показники становили відповідно 32,5 та 26,83 шт., що свідчить про вищу інтенсивність симбіотичних процесів у першого сорту. Водночас маса активних бульбочок у сорту Паллада (0,61 г) була дещо більшою порівняно з ЕС Ментор (0,55 г), що вказує на компенсаторний механізм реалізації симбіозу через укрупнення окремих функціонально активних утворень.

Перехід до ресурсозберігаючих систем обробітку ґрунту (mini-till і strip-till) супроводжувався загальною тенденцією до зниження кількості та маси бульбочок, однак ступінь цієї редукції був сортоспецифічним. Так, за mini-till у сорту ЕС Ментор кількість загальних бульбочок зменшилася до 38,0 шт., а активних – до 30,98 шт., тоді як у сорту Паллада відповідні значення становили лише 27,5 і 22,59 шт., що корелювало зі зниженням загального симбіотичного потенціалу до 202–210 тис. кг×діб/га. Разом з тим, застосування strip-till частково нівелювало негативний вплив мінімалізації обробітку, забезпечивши формування 44,0 бульбочок у сорту ЕС Ментор і 31,5 – у сорту Паллада, а також підвищення активного симбіотичного потенціалу до 173,5–179,0 тис. кг×діб/га, що свідчить про кращі аераційні та термічні умови ґрунту в зоні рядка (табл. 1).

Таблиця 1

**Розвиток нодуляційного апарату та симбіотичний потенціал сортів сої
за різних систем обробітку ґрунту, 2024–2025**

Система обробітку	Сорт	Кількість бульбочок, шт		Маса бульбочок, г		Симбіотичний Потенціал, тис.кг×діб/га	
		загальна	активних	загальна	активних	загальний	активний
Традиційна	ЕС Ментор	45,5	36,40	0,69	0,55	223	177,50
	Паллада	32,5	26,83	0,74	0,61	215	182,50
Mini-till	ЕС Ментор	38,0	30,98	0,59	0,48	210	170,00
	Паллада	27,5	22,59	0,63	0,52	202	175,00
Strip-till	ЕС Ментор	44,0	37,18	0,67	0,57	219	173,50
	Паллада	31,5	27,46	0,71	0,62	212	179,00
	\bar{X}	36,50	30,24	0,67	0,56	213,17	176,25
	SD	6,60	5,24	0,05	0,05	6,71	4,01
	CV, %	18	17	7	9	3	2

Результати статистичної обробки даних підтверджують середній рівень варіабельності кількісних показників нодуляції (CV = 17–18 %), тоді як маса бульбочок характеризувалася відносно низькою мінливістю (CV = 7–9 %), що вказує на генетично детерміновану стабільність цього показника незалежно від системи

обробітку ґрунту. Найменша варіація була притаманна симбіотичному потенціалу ($CV = 2-3\%$), що дозволяє розглядати його як інтегральний і надійний критерій оцінки ефективності симбіозу сої з ризобіями. Загалом отримані результати свідчать, що сорт ЕС Ментор характеризується вищою пластичністю нодуляційного апарату та кращою адаптацією до різних систем обробітку ґрунту, тоді як сорт Паллада реалізує симбіотичний потенціал переважно за умов оптимізованої структури орного шару.

Узагальнення експериментальних даних свідчить, що формування та функціональна активність нодуляційного апарату сої є результатом складної взаємодії генотипових особливостей сорту та агрофізичних умов, зумовлених системою обробітку ґрунту (рис. 2).

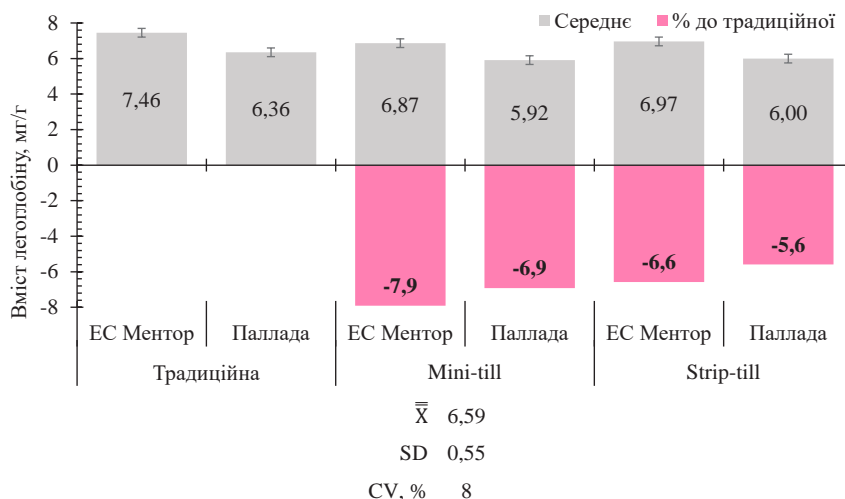


Рис. 2. Уміст леґоглобіну в бульбочках сої за різних систем обробітку ґрунту, 2024–2025

Отримані результати вмісту леґоглобіну свідчать, що за традиційної системи обробітку ґрунту формувалися найвищі значення вмісту леґоглобіну в бульбочках обох досліджуваних сортів, що вказує на оптимальні умови аерації орного шару, мінерального живлення та розвитку симбіотичного апарату. Так, у сорту ЕС Ментор вміст леґоглобіну становив 7,46 мг/г, тоді як у сорту Паллада цей показник був нижчим і дорівнював 6,36 мг/г, що може свідчити про генетично зумовлені відмінності у потенціалі симбіотичної азотфіксації та інтенсивності функціонування бульбочкових бактерій.

Перехід до ґрунтозахисних систем обробітку, зокрема mini-till та strip-till, супроводжувався зниженням вмісту леґоглобіну в бульбочках сої незалежно від сорту, однак ступінь цього зниження був неоднаковим.

За умов mini-till у сорту ЕС Ментор вміст леґоглобіну зменшувався до 6,87 мг/г, що відповідало зниженню на 7,9 % порівняно з традиційною системою, тоді як у сорту Паллада він становив 5,92 мг/г, або на 6,9 % менше контрольного варіанта. Це може бути пов'язано з певним ущільненням ґрунту в прикореневій зоні та обмеженням дифузії кисню, що безпосередньо впливає на біосинтез леґоглобіну як ключового регулятора кисневого режиму в бульбочках.

За системи strip-till зниження показника було менш вираженим порівняно з mini-till, що свідчить про більш сприятливе поєднання локального розпушування ґрунту в рядку та збереження структури міжрядь. Зокрема, у сорту ЕС Ментор вміст леоголобіну становив 6,97 мг/г, що на 6,6 % менше традиційної системи, тоді як у сорту Паллада – 6,00 мг/г із відхиленням на рівні –5,6 %. Така реакція вказує на те, що strip-till забезпечує кращі умови для формування функціонально активних бульбочок порівняно з mini-till, особливо для сортів із вищим потенціалом симбіотичної активності.

У цілому аналіз підтверджує, що система обробітку ґрунту є суттєвим агротехнічним фактором, який модифікує фізико-біологічні умови ґрунтового середовища та, відповідно, інтенсивність накопичення леоголобіну в бульбочках сої, при цьому сортові особливості визначають амплітуду реакції рослин на зміну технології обробітку.

Встановлено, що традиційна система обробітку ґрунту забезпечувала найвищі показники симбіотичної азотфіксації в обох досліджуваних сортів, що зумовлено формуванням оптимального агрофізичного стану орного шару, сприятливого водно-повітряного режиму та інтенсивного розвитку бульбочкових бактерій. Зокрема, у сорту ЕС Ментор обсяг фіксованого азоту становив 111,8 кг/га, тоді як у сорту Паллада цей показник був істотно нижчим – 87,0 кг/га, що свідчить про вищу симбіотичну ефективність та потенціал біологічної азотфіксації у першого сорту (рис. 3).

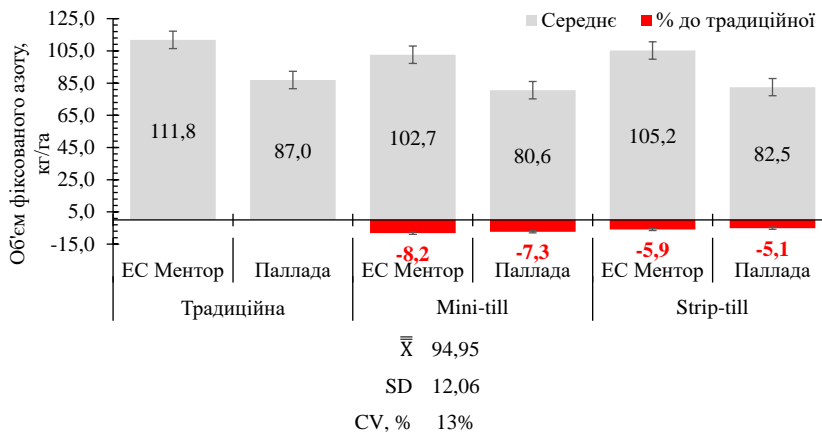


Рис. 3. Об'єм фіксованого азоту рослинами сої за різних систем обробітку ґрунту, 2024–2025

Застосування системи mini-till супроводжувалося помітним зниженням обсягу фіксованого азоту в обох сортів, причому інтенсивність зменшення була дещо більшою у сорту ЕС Ментор. Так, за умов мінімального обробітку ґрунту обсяг фіксованого азоту у цього сорту зменшувався до 102,7 кг/га, що на 8,2 % або на 9,2 кг/га менше порівняно з традиційною системою, тоді як у сорту Паллада він становив 80,6 кг/га, що відповідало зниженню на 7,3 % або на 6,4 кг/га. Така тенденція може бути зумовлена частковим ущільненням ґрунту, зниженням інтенсивності мінералізаційних процесів та обмеженням аерації кореневмісного шару, що негативно впливає на активність ризобіальної симбіотичної системи.

За системи strip-till негативний вплив на процеси біологічної азотфіксації був менш вираженим порівняно з mini-till, що свідчить про кращі умови локального розвитку кореневої системи та бульбочок у зоні обробленого рядка. У сорту ЕС Ментор обсяг фіксованого азоту за цієї системи становив 105,2 кг/га, що на 5,9 % або на 6,6 кг/га менше традиційного варіанта, тоді як у сорту Паллада – 82,5 кг/га із зниженням на 5,1 % або на 4,5 кг/га. Відносно менші втрати азотфіксувальної здатності за strip-till вказують на те, що поєднання локального розпушування з мінімальним втручанням у міжряддях забезпечує більш стабільне функціонування симбіотичного апарату сої.

Загалом аналіз показує, що сорт ЕС Ментор характеризувався вищим абсолютним рівнем фіксації атмосферного азоту за всіх систем обробітку ґрунту, однак водночас демонстрував дещо більшу чутливість до зниження інтенсивності обробітку, тоді як сорт Паллада мав нижчий потенціал азотфіксації, але відзначався відносно стабільнішою реакцією на зміну технології.

Висновки і пропозиції. Встановлено, що традиційна система обробітку забезпечує найсприятливіші умови для ініціації та розвитку бульбочок, що проявляється у максимальних значеннях їх кількості, маси та симбіотичного потенціалу, тоді як мінімалізація обробітку (mini-till) супроводжується статистично значущим зниженням інтенсивності нодуляції, зумовленим ущільненням ґрунту, обмеженням аерації та локальним дефіцитом вологи в ризосфері.

Разом із тим доведено, що система strip-till, поєднуючи елементи мінімального втручання з локальним розпушенням у зоні рядка, створює компромісні умови, за яких показники активної нодуляції та симбіотичного потенціалу наближаються до традиційного обробітку, що підтверджує її агроекологічну доцільність для вирощування сої.

Традиційна система обробітку ґрунту створює найсприятливіші умови для реалізації потенціалу симбіотичної азотфіксації сої, забезпечуючи максимальний обсяг фіксованого азоту, тоді як системи mini-till і strip-till призводять до помірного зниження цього показника; при цьому strip-till є більш адаптивною альтернативою мінімальному обробітку, оскільки дозволяє зменшити негативний вплив на азотфіксувальну здатність рослин, особливо у високопродуктивних сортів, таких як ЕС Ментор, що має важливе значення для оптимізації ресурсозберігаючих технологій вирощування сої.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Bertheau Y. Davison J. Soybean in the European Union, status and perspective. In: *Recent Trends for Enhancing the Diversity and Quality of Soybean Products* / Ed. D. Krezhova. London: IntechOpen Access, 2011. P. 3–47. URL: <https://www.intechopen.com/books/recent-trends-for-enhancing-the-diversity-and-quality-of-soybean-products/soybean-in-the-european-union-status-and-perspective> (accessed: 01.02.2026).
2. Gawęda D. Nowak A. Haliniarz M. Woźniak A. Yield and economic effectiveness of soybean grown under different cropping systems. *International Journal of Plant Production*. 2020. Vol. 14. P. 475–485. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42106-020-00098-1>.
3. Page K. L. Dang Y. P. Dalal R. C. The ability of conservation agriculture to conserve soil organic carbon and the subsequent impact on soil physical, chemical, and biological properties and yield. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2020. Vol. 4. P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00031>.

4. Sánchez E. J. G. Ordóñez-Fernández R. Carbonell-Bojollo R. Veroz-González O. Gil-Ribes J. A. Meta-analysis on atmospheric carbon capture in Spain through the use of conservation agriculture. *Soil and Tillage Research*. 2012. Vol. 122. P. 52–60. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.03.001>.
5. Brouder S. Gomez-Macpherson H. The impact of conservation agriculture on smallholder agricultural yields: A scoping review of the evidence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2014. Vol. 187. P. 11–32. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.08.010>.
6. Kertész Á. Madarász B. Conservation agriculture in Europe. *International Soil and Water Conservation Research*. 2014. Vol. 2. P. 91–96. DOI: [https://doi.org/10.1016/S2095-6339\(15\)30016-2](https://doi.org/10.1016/S2095-6339(15)30016-2).
7. Ferreira M. C. Andrade D. D. S. Chueire L. M. D. O. Takemura S. M. Hungria M. Tillage method and crop rotation effects on the population sizes and diversity of bradyrhizobia nodulating soybean. *Soil Biology & Biochemistry*. 2000. Vol. 32. P. 627–637. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00189-3](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00189-3).
8. Hardarson G. Danso S. K. A. Methods for measuring biological nitrogen fixation in grain legumes. *Plant and Soil*. 1993. Vol. 152. P. 19–23. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00016330>.
9. Tajima R. Lee O. N. Abe J. Lux A. Morita S. Nitrogen-fixing activity of root nodules in relation to their size in peanut (*Arachis hypogaea* L.). *Plant Production Science*. 2007. Vol. 10. P. 423–429. DOI: <https://doi.org/10.1626/pps.10.423>.
10. Ayanaba A. Nangju D. Nodulation and nitrogen fixation in six grain legumes. In: *Proceedings of the First IITA Grain Legume Improvement Workshop, International Institute of Tropical Agriculture*. Ibadan, Nigeria, 29 October–2 November 1973. P. 198–204.
11. Kombiok J. M. Buah S. S. J. Tillage depth effects on nodulation, nitrogen fixation and yield of three soybean varieties in the Northern Savanna zone of Ghana. *African Journal of Agricultural Research*. 2013. Vol. 8. P. 2340–2345. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJAR12.1304>.
12. Kemal D. Ismail C. Mustafa G. Ali C. Dogan K. Celik I. Gok M. Coskan A. Effect of different soil tillage methods on rhizobial nodulation, biomass and nitrogen content of second crop soybean. *African Journal of Microbiology Research*. 2011. Vol. 5. P. 3186–3194. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJMR11.165>.
13. Kihara J. Martius C. Bationo A. Vlek P. L. G. Effects of tillage and crop residue application on soybean nitrogen fixation in a tropical Ferralsol. *Agriculture*. 2011. Vol. 1. P. 22–37. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture1010022>.
14. Unkovich M. Herridge D. Peoples M. Cadisch G. Boddey R. Giller K. *Measuring plant-associated nitrogen fixation in agricultural systems*. Canberra: Australian Centre for International Agricultural Research (ACIAR), 2008. P. 132–188.

Дата першого надходження статті до видання: 02.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 01.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026