

УДК 635.15:631.5

DOI <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2025-4.23>

Цицюра Я. Г.

*кандидат сільськогосподарських наук,
доцент кафедри землеробства, ґрунтознавства та агрохімії,
Вінницький національний аграрний університет
Вінниця, Україна**E-mail: yaroslavtsyura@ukr.net**ORCID: 0000-0002-9167-833X*

ЕФЕКТИВНІСТЬ СИДЕРАЦІЇ БІОФУМІГАЦІЙНОГО СПРЯМУВАННЯ ЗА ВИКОРИСТАННЯ РЕДЬКИ ОЛІЙНОЇ У ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОЩУВАННЯ СОЇ

Анотація

Розглянуто та проаналізовано актуальність та агротехнологічну доцільність біофумігації у складі єдиного комплексу сидерального удобрення сільськогосподарських культур. Сформульовано переваги технологій біофумігації з позиції позитивного впливу на комплекс властивостей ґрунту, оптимізації еколого-функціональних груп мікроорганізмів, формування засад біологічного контролю сегетальної рослинності агроценозів польових культур та результуючий вплив на реалізацію їх урожайного потенціалу. Виокремлено переваги біофумігації у складі систем сидерального удобрення для хрестоцвітних видів рослин сидератів як найбільш поширених у світовій практиці біофумігаційних технологій.

За період досліджень 2023–2025 рр. у виробничому середовищі оцінено ефективність застосування редьки олійної у варіантах технології сидерації із супутнім біофумігаційним ефектом за вирощування сої у додаток до базової системи удобрення прийнятої у господарстві.

Оцінено сидераційний та біофумігаційний потенціал редьки олійної з огляду на гідротермічні умови періоду сидерального вирощування та зроблено висновок щодо ефективності редьки олійної як сидерату для умов нестійкого зволоження на чорноземах опідзолених.

Застосовано широке коло рекомендованих та апробованих методик з оцінки рівнів виходу листостеблової та кореневої маси рослин, а також для оцінки наявного у редьки олійної антисегетального та біофумігаційного потенціалу.

На підставі оцінки експериментальних даних сформовано досяжні рівні зниження забур'яненості агроценозів сої у розрізі видових груп бур'янів за кількісними та ваговими параметрами, оцінено динаміку зміни структури мікробіологічного комплексу ґрунту з огляду на систематизовану корисну та некорисну, а також інертну мікробіоту, оцінено реалізацію урожайного потенціалу сої у співставленні застосованих варіантів дослідів.

За рахунок узагальнення результатів доведено доцільність застосування сидерації біофумігаційного спрямування з використанням редьки олійної за вирощування сої для поєднання позитивної дії, збільшення урожайності з позитивними чинниками ґрунтозбереження й оптимізації мікробіологічного потенціалу ґрунту та зниження рівня його сегетальної деградації.

Ключові слова: біофумігаційний та сидераційний потенціал, структура мікробіоти ґрунту, рівень забур'яненості, урожайність.

Вступ. Біофумігація є інноваційним напрямом у системах органічного землеробства та важливим супутнім складником сидеральних систем удобрення. Він базується на доведених базових принципах алелопатичної [20, с. 69–70], антипатогенної та ентомологічно регулюючої дії біохімічних похідних [16, с. 172–174; 34, с. 39–40], отриманих у результаті розкладу у ґрунтовому профілі рослинної біомаси різновидового походження. Сам термін виник зовсім недавно і був уведений у загальне користування із середини минулого десятиліття [5, с. 2; 6, с. 2–3]. Сьогодні біофумігація розглядається як базова основа всіх агротехнологій біоорганічного спрямування, спрямованих на зниження ґрунтової деградації [25, с. 25–27], забезпечення збереження потенціалу родючості ґрунтів [35, с. 507–509], запобігання процесам ґрунтового та фітотоксичності ґрунтового покриву [19, с. 315–316; 38, с. 1017–1019], зниження рівнів сегетальної деградації агроценозів наступних культур [17, с. 234–235; 22, с. 7–10], якісне посилення фіторе-медіаційних технологій [26, с. 191–192; 28, с. 2–3] та як вагома альтернатива класичним системам мінерального удобрення на ґрунтах із низьким потенціалом ґрунтової родючості [4, с. 3; 7, с. 2–3; 9, с. 5; 10, с. 7–10; 15, с. 2256–2257]. Технологія біофумігації позитивно узгоджується з положеннями та принципами європейського «зеленого курсу» у напрямі реалізації сучасних агротехнологій, забезпечення органічності вирощеної продукції, зниження її собівартості за одночасного підвищення ринкової привабливості, формування засад до зниження дегуміфікації та декальцинації ґрунтів, гарантування високих рівнів мікробіологічного потенціалу ґрунтового профілю, істотного зниження його різновидової фітотоксичності тощо [9, с. 2–4; 11, с. 287–288; 21, с. 375–377].

Разом із тим підходи до реалізації біофумігації базуються на двох основних технологічних рішеннях: внесення спеціальних компонентів та речовин, які володіють вираженим біофумігаційним ефектом і є в цілому безпечними для ґрунтового біокомплексу [12, с. 2–7; 17, с. 234–235; 18, с. 71–73; 21, с. 380; 28, с. 2–3], та забезпечення реалізації

биофумігационних процесів у ґрунтовому профілі за рахунок прямої сидерації у різних її технологічних варіантах [14, с. 300; 30, с. 2–3; 31, с. 7–10; 32, с. 265–267; 36, с. 389]. При цьому пряма сидерація розглядається як більш доцільне та бажане агротехнологічне рішення для забезпечення процесів біофумігації [31, с. 5–7].

Сидерація – відомий та широко апробований спосіб природного варіанту біоциклічного способу колообігу біогенних елементів у системі «ґрунт – довкілля», що базується на функціонуванні ґрунтового середовища як складної системи, для якої найбільш властивими є реутилізація та іммобілізація свіжої органічної маси і похідних різновидових рослинних відходів, що гарантує ґрунтозбереження за рахунок нормалізації фітоценологічних взаємозв'язків у агроценозі, зниження рівня екологічного та агрохімічного тиску на тлі одночасного ефективного поповнення ґрунтового профілю органікою та цілою низкою біогенних елементів та фітоактивних сполук. Це додатково дає змогу істотно знизити потреби в дороговартісних мінеральних добривах та компенсувати потребу у дефіцитній сьогодні органіці тваринного походження – гноєві [3, с. 5–7].

Відзначається, що біофумігационний потенціал культур, які застосовуються як сидерати, є різним як за потенціалом реалізації, так і за ефективністю. Це вимагає пошуку відповідних видів сидератів чи їхніх сумішей для забезпечення як ефективного процесу сидерації, так і гарантування агрономічно доцільного рівня супутнього біофумігационного ефекту [11, с. 288–290].

У цьому плані слід відзначити, що хрестоцвіті види сидератів віднесено до високоефективних сидеральних культур, які володіють високою адаптивністю, вираженою толерантністю до зміни строків сівби, високими темпами наростання надземної та кореневої біомаси якісного біохімічного складу та за рахунок умісту глюкозинолатів у ній – володіють вираженими потенційними біофумігационними властивостями, які опосередковано досить широко використовуються у практиці загального оздоровлення ґрунту [12, с. 5–7; 15, с. 2256–2257; 18, с. 71–73].

Мета роботи – дослідження та оцінка ефективності сидерального застосування з біофумігационним ефектом редьки олійної (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.) у технології вирощування сої у виробничих умовах конкретного сільськогосподарського підприємства.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження проводили впродовж 2023–2025 рр. в умовах СТОВ «Дружба» (с. Ульянівка Вінницького району Вінницької області) на чорноземах опідзолених. Ґрунтовий покрив дослідних ділянок мав такі агрохімічні показники: уміст гумусу – 3,09%, легкогідролізованого азоту – 97,5 мг/кг ґрунту, рухомого фосфору – 136,5 мг/кг ґрунту, обмінного калію – 104,9 мг/кг ґрунту, pH_{KCl} – 6,1.

Використовувалася система літнього вирощування редьки олійної на неудобреному фоні з нормою висіву 2,5 млн схожих насінин/га звичайним рядковим способом. Редьку олійну вирощували до фази цвітіння (BBCH 64–67), коли вміст глюкозинолатів у рослині досягав свого максимуму. Вирощену масу підкошували з одночасним подрібненням на відрізки довжиною 3–4 см (використання мульчера типу Mateng EF 155) із заробкою її у ґрунт інтенсивним ротаційним дисковим переміщенням із ґрунтом на глибину 14–16 см та подальшим біоконсервуванням на 5–7 діб шляхом вкриття поверхні ґрунту після загортання сидерату білим агроволокном (звичайного типу геотекстиль зі щільністю 30–50 г/м²). Агроволокно застосовувалося для збереження біофумігационного ефекту за розкладення глюкозинолатів у листостебловій масі редьки олійної та оптимізації початкових процесів розкладу маси у ґрунті. Контрольним був варіант без застосування сидерації. Було використано сорт редьки олійної Журавка комбінованого кормово-сидерального типу.

Указаний варіант сидерального використання редьки олійної було застосовано за вирощування середньораннього сорту сої Бетіната. За результатами зонального сортовипробування сорт має високу стійкість до вилягання (8–9 балів) та комплексу хвороб (7–9 балів). Рівень урожайності сорту досягав 2,5–3,0 т/га.

Технологія вирощування сої у господарстві та застосована система її удобрення на варіантах досліді детально описані у попередній публікації [23, с. 39–40], оскільки господарство є базою для проведення прикладних досліджень відповідно до договірних зобов'язань із Вінницьким НАУ. Вона була загалом традиційною щодо строків та норми висіву та відрізнялася застосуванням комплексу фонових мінеральних живлення і мікродобрив. Зокрема, на обох варіантах (без сидерації та за її застосування) було використано таку технологічну схему догляду та удобрення: фонове удобрення N₂₀P₂₀S₉ + протруєння насіння (Максим XL, 2 л/т) + інокуляція (ХайКот Супер (BASF), 2,5 л/т) + позакореневі підживлення (мікродобриво Wonder Leaf Mikro (фенологічна фаза «гілкування», 2 л/га) + Wonder Leaf Yellow (фенологічна фаза «бутонізація – цвітіння», 2 кг/га) + мікродобриво Wonder Leaf Mono Bor (фенологічна фаза «бутонізація – цвітіння», 2 л/га).

Дослідні ділянки було сформовано у чотириразовій повторності методом дрібноділянкової рендомізації (загальна площа ділянки – 40 м², облікова площа ділянки – 25 м²).

Облік надземної маси рослин проводився на стадії цвітіння методом облікових ділянок (1 м²) (4 у кожному повторенні шляхом послідовного зважування на лабораторних вагах (WALCOM LB3002 (± 0,01 г)) [2, с. 41].

Показник сформованої кореневої біомаси визначався на підставі застосування стандартних підходів методу мікромонологів, який детально описано у [33, с. 421–422].

Переведення сформованої загальної сидеральної маси рослин редьки олійної у класичний напівперепрілий гній ВРХ було проведено на підставі тривалої супутньої біохімічної оцінки редьки олійної за різнострокового сидерального використання [32, с. 1030–1035] та базових рекомендацій такої калькуляції [8, с. 3–7].

Уміст сухої речовини у надземній та кореневій масі рослин визначали шляхом висушування до постійної маси за 105°C та озолення – за 550°C.

Для оцінки рівня забур'яненості у агроценозі сортів сої було застосовано методику обліку бур'янів за кількісними та ваговими параметрами Європейської асоціації гербологів (EWS) у 2012 р. та прийняту до застосування в Україні у 2013 р. [27, с. 10–27] з обліком у 5 облікових квадратах у 4-х повтореннях досліді площею кожен по 1 м².

Біофумігаційний потенціал сидеральної маси редьки олійної було оцінено за вмістом глюкозинолатів у надземній та кореневій біомасі рослин відповідно до критерійної оцінки процесу біофумігації [9, с. 5–10]. Сам уміст глюкозинолатів визначався відповідно до ISO 9167:2019 [12, с. 5–17].

Мікробіологічний аналіз ґрунту, відповідно до стандартних протоколів лабораторних випробувань, було проведено на базі сертифікованого та акредитованого центру лабораторних досліджень і розробок «МікроБіо Лаба» (м. Теплодар Одеської області). При цьому відбір проб ґрунту на мікробіологічний аналіз було здійснено з шару ґрунту 0–30 см відповідно до ДСТУ ISO 10381–6–2001 [1, с. 2–4].

Облік урожайності сортів сої було проведено відповідно до рекомендованої методики за вивчення біологічних та генетичних ресурсів зернобобових культур [2, с. 40–41].

Гідротермічні умови періоду досліджень підтвердили належність території досліджень до режиму нестійкого зволоження (табл. 1). Показники періоду досліджень було оцінено з огляду на забезпечення режиму формування сидеральної біомаси та подальшої її іммобілізації у ґрунтовому профілі як період із відносно нестійким зволоженням за оптимуму показника для умов сидерації 2022/2023 р. та з мінімальним режимом оптимальності для умов 2023/2024 р.

Із позицій ростових фізіологічних процесів рослин сої роки оцінки було оцінено в такому порядку зростання: 2024–2025–2023. Зокрема, для умов 2024 р. було відзначено екстремально посушливий період липня–серпня, що вплинуло на формування плодоеlementів рослин сої, а для умов 2025 р. вегетації – аномально прохолодний весняний період, що вплинув на строки сівби сої та подальші темпи росту і розвитку рослин та прискорені процеси диференціації елементів їхньої продуктивності. У цілому погодні умови були відносно сприятливими для реалізації урожайного потенціалу сої на рівні вище середнього регіонального.

Таблиця 1. Показники гідротермічного режиму періоду вегетації сидератів та рослин сої, 2022–2025 рр.

Роки та періоди оцінки VII–XII/I–IX	За період				
	показник середнь-добової температури повітря за період, °C	загальна сума активних температур, °C	сума опадів, мм	відносна вологість повітря, %	загальний індекс зволоження, мм/°C
2022/2023	8,23	2508,7	769,7	76,2	0,31
2023/2024	9,79	3011,4	702,5	74,5	0,23
2024/2025	8,54	2689,9	988,9	75,3	0,37

Статистична обробка результатів досліджень передбачала застосування показників варіаційної статистики у статистичних програмах Statistica 10 (StatSoft – Dell Software Company, США). Для статистичної оцінки було використано такі показники, як середнє арифметичне, стандартне відхилення, коефіцієнт варіації. Для визначення статистичної істотності відмінностей між варіантами було застосовано метод дисперсійного аналізу відповідно до стандартної схеми [29, с. 107–123].

Результати обліку сформованої біомаси рослинами редьки олійної за всі періоди обліків засвідчили як високі адаптивні, так і високі продуктивні властивості рослин редьки олійної у варіанті її проміжного (літнього) сидерального вирощування (рис. 1).

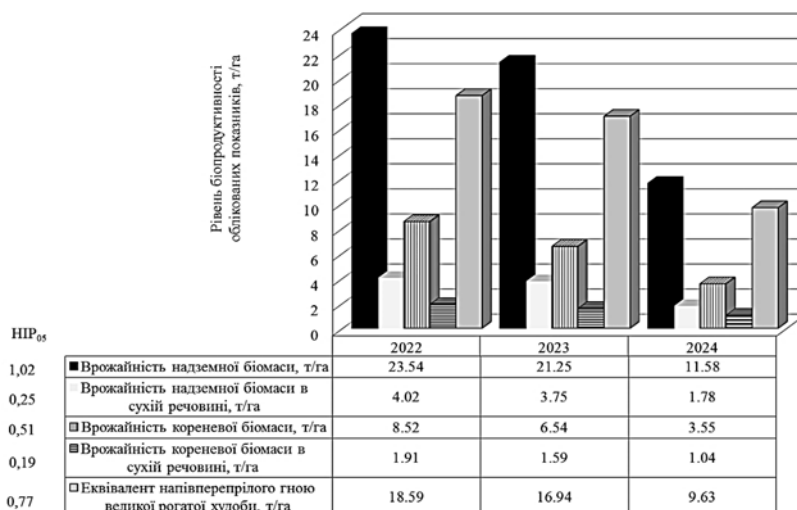


Рис. 1. Сидеральна біопроductивність редьки олійної за період її літнього (проміжного) вирощування як сидерального попередника під сою, 2022–2024 рр., т/га

У середньому за трирічний період оцінки загальна сформована біомаса сидерату з редьки олійної була на рівні 24,99 т/га у сирій біомасі та 4,70 т/га у сухій речовині, що в еквівалентному виразі гною ВРХ відповідало удобрювальному еквіваленту 15,05 т/га. Разом із тим визначене міжрічне варіювання показників сидеральної біопродуктивності у значенні коефіцієнта варіації (C_v) на рівні 33,78% для показника врожайності надземної листостеблової маси та 40,33% для показника кореневої біомаси вказує на чутливість редьки олійної до гідротермічних умов періоду сидерального вирощування, що у цілому є характерним для хрестоцвітої групи сидератів [3, с. 150–153]. Проте слід зауважити, що, з огляду на оцінку продуктивності різних видів рослин-сидератів [10, с. 7–9], редька олійна демонструє відносну сталість продуктивності, маючи у середньому на 7,5–12,5% менший варіативний складник за показником формування біомаси, ніж це характерно для традиційних бобових та складноцвітих видів сидератів. А за виходом сухої маси на рівні вище 4 т/га може бути віднесена до високопродуктивних нішевих сидеральних культур. Така оцінка підтверджена й у низці інших досліджень [11, с. 288–290; 13, с. 8–11; 24, с. 383–384], де редьці олійній відводиться важлива роль у системі біоорганічного удобрення біофумігаційного характеру на ґрунтах із невисоким потенціалом ґрунтової родючості в умовах нестійкого зволоження.

Визначено, що ефективний біофумігаційний потенціал сидеральної маси визначається величиною виходу глюкозинолатів з одиниці площі за еквівалентного їх виходу з одиниці сухої речовини сидерату [10, с. 14–18; 15, с. 2257–2259; 17, с. 234–235]. При цьому вважається, що доцільно-достатній рівень виходу глюкозинолатів із рослини у цілому, яка використовується у формі зеленого добрива, становить бажаний рівень вище 50 моль/га [18, с. 72–73; 19, 316–318].

Проведена багаторічна оцінка глюкозинолатного портфолію сформованої надземної та кореневої біомаси редьки олійної підтвердила технологічну належність редьки олійної до ефективних компонентів сидераційних технологій біофумігаційного характеру (табл. 2). Такий висновок узгоджується з рівнем сукупного виходу глюкозинолатів, який у середньому за період досліджень становив 86,71 моль/га. Якщо порівнювати даний показник із подібним у інших традиційних хрестоцвітих видів сидератів, посиляючись на низку подібних оцінок, слід зауважити, що інтервал даного показника для зони помірно континентального клімату з ґрунтами середнього рівня родючості у гірчиці білої коливається в межах від 39 до 110 моль/га [4, с. 3–4; 7, с. 5–7; 11, с. 288–290], для ріпаку ярого – 35–90 моль/га [11, с. 288–290] та у ріпаку озимого – 50–130 моль/га [14, с. 301; 15, с. 2257; 19, с. 317–318]. З огляду на це, для Лісостепової зони України редька олійна є ефективним кандидатом для запровадження біофумігаційних технологічних рішень у рамках застосування біоорганічного удобрення за рахунок її сидеральної маси.

Таблиця 2. Біофумігаційний потенціал сидеральної маси редьки олійної за варіанту проміжного сидерального її вирощування, 2022–2024 рр.

Біомаса рослин	Уміст глюкозинолатів, мкмоль/г сухої речовини			Біофумігаційний потенціал за виходом глюкозинолатів, моль/га		
	2022	2023	2024	2022	2023	2024
Листостеблова	17,25 ^a	18,11 ^a	19,27 ^b	69,35 ^a	67,91 ^a	34,30 ^b
Коренева	19,54 ^a	18,29 ^b	21,31 ^c	37,32 ^a	29,08 ^b	22,16 ^c
Сукупний	–	–	–	106,67 ^a	96,99 ^b	56,46 ^c

Різні малі літери в таблиці вказують на значущі відмінності між значеннями показника у міжрічному співставленні для $p < 0,05$.

Підтвердженням біофумігаційного потенціалу загальної сидеральної маси редьки олійної (корені + листостеблова маса) є результати оцінки впливу сидерації на забур'яненість агроценозу сої, яка вирощувалась у єдиній технологічній схемі із застосуванням редьки олійної як сидерату та зміни мікробіологічної структури ґрунту з позиції контролю зниження її видів патогенного характеру.

Щодо оцінки антисегетальної направленості сидерації (табл. 3), то її результати доводять ефективність такого заходу як варіант біологічного контролю рівня забур'яненості за формування агроценозів сої. У всі роки обліку встановлено редукуючий ефект рясності бур'янів усіх видових груп як за кількістю, так і за вагою. Динаміку такої редукції представлено на рис. 2.

У середньому за трирічний цикл обліків ранжований ряд зростання знижуючого ефекту на видові групи бур'янів в агроценозі сої слід розмістити у такому порядку: багаторічні (зниження до контролю без сидерації 22,10%) – ярі ранні (26,02%) – зимуючі (28,68%) – ярі пізні (31,98%). Аналогічний ряд представлено у середньо-багаторічному вимірі і для вагової характеристики бур'янів.

Таблиця 3. Кількість та маса бур'янів у межах їхніх біологічних груп в агроценозі сої на фенологічну фазу початку бутонізації (ВВСН 51–53) залежно від варіанту дослідів, 2023–2025 рр.

Варіант сидерації	Кількість бур'янів, шт./м²					Маса бур'янів, г/м²				
	біологічні групи бур'янів				всього	біологічні групи бур'янів				всього
	ярі ранні	ярі пізні	зимуючі	багаторічні		ярі ранні	ярі пізні	зимуючі	багаторічні	
2023										
Без сидерату (контроль)	8,4	9,3	2,6	1,8	22,1	68,5	52,8	21,3	11,5	154,1
Проміжна сидерація з редькою олійною	6,5	6,6	2,0	1,5	16,6	49,0	39,3	16,7	7,9	112,9
2024										
Без сидерату (контроль)	7,9	10,7	1,8	1,5	21,9	71,5	63,2	18,7	20,4	173,8
Проміжна сидерація з редькою олійною	5,8	6,5	1,2	1,2	14,7	44,9	48,9	12,3	14,5	120,6
2025										
Без сидерату (контроль)	14,2	12,3	2,7	2,7	31,9	77,8	82,9	27,9	16,8	205,4
Проміжна сидерація з редькою олійною	10,1	8,9	1,9	1,9	22,8	56,5	60,9	19,8	13,4	150,6
НІР ₀₅	1,2	0,7	0,9	0,4	0,7	11,4	10,2	9,1	2,7	28,4

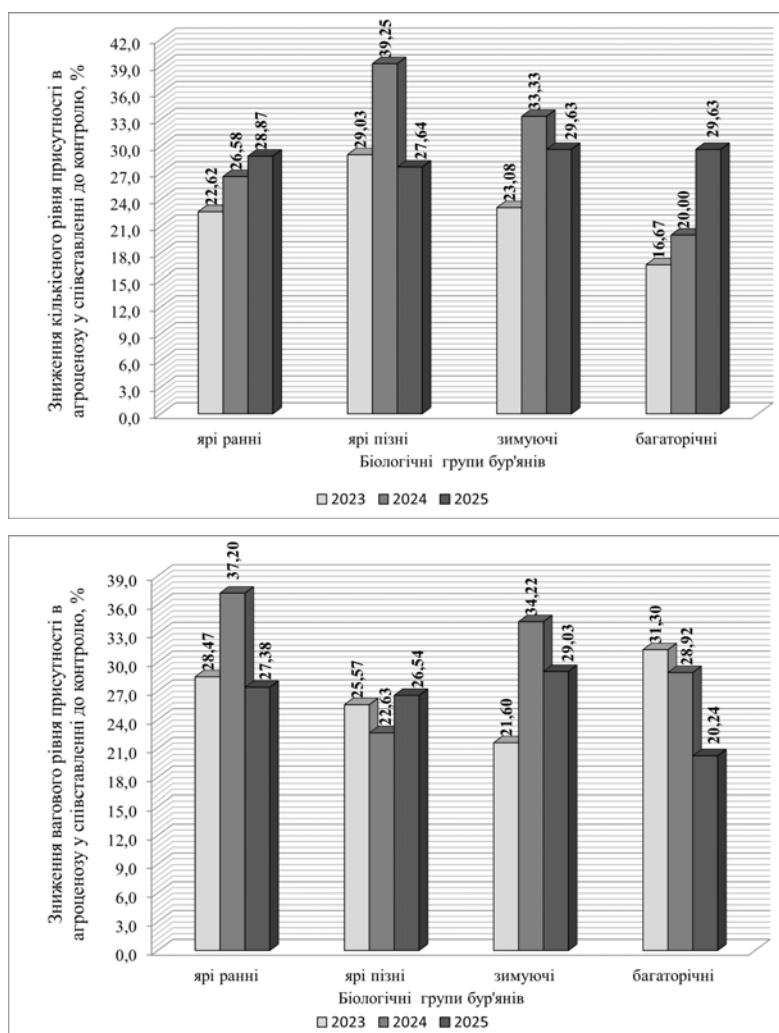


Рис. 2. Зниження забур'яненості агроценозу сої за кількісною (верхня позиція) та ваговою (нижня позиція) присутністю у співставленні варіантів біофумігаційної сидерації та контрольного без неї (2023–2025), %

Установлені особливості позитивно узгоджуються з низкою висновків подібних наукових досліджень щодо ролі сидерації в обмеженні чисельності бур'янів. Зокрема, встановлено [22, с. 27–29], що хрестоцвіті види сидератів найбільш ефективно сприяють зниженню саме групи ярих бур'янів як ранньої, так і пізньої групи. Це

пояснюється специфічністю їхнього алелопатичного потенціалу, підсиленого біофумігаційною дією щодо видів близького календарного циклу розвитку.

Указується також [31, с. 11], що показник зниження має певні видові особливості, зокрема гірчиця біла має переваги у цьому плані перед ріпаком ярим та озимим, забезпечуючи зниження рівня забур'яненості до 25–35% залежно від культури, яка слідує у сівозміні, та гідротермічних умов зони оцінки. Виходячи із цих тверджень, редька олійна не поступається за ефективністю гірчиці білій, яка має більш широке застосування в українській практиці сидерації, зокрема у випадку соєвих агроценозів сприяє зниженню рівня забур'яненості у середньому за цикл досліджень на 28,76% за загальною чисельністю бур'янів та на 28,01% за ваговим чинником їх присутності. У цілому за рахунок біофумігаційного потенціалу (згідно з [14, с. 300; 22, с. 35]) хрестоцвіті види сидератів у плані протибур'янової ефективності в 1,2–1,3 рази ефективніші.

Установлена позитивна дія біофумігаційного ефекту від застосування сидеральної маси редьки олійної і на зміну структури мікробіоти ґрунту, що підтверджено усередненим варіантом структури еколого-функціональних груп ґрунтових мікроорганізмів (табл. 4).

За результатами оцінки мікробіологічної структури ґрунту визначено, що за рахунок біофумігаційної сидерації досягнуто істотне поліпшення співвідношення між корисною та інертною мікрофлорою ґрунту. Так, кількість оліготрофів зменшилася у середньому на 11,11%, а кількість мікроорганізмів групи сапрофітних грибів – на 16,34% (середня для групи видів).

Разом із тим відзначено істотне зростання азотфіксувальної мікробіоти на 15,6%, фосформобілізуючих бактерій – на 17,1%, амоніфікаторів – на 7,6%, нітрифікаторів – на 10,23%. При цьому слід відзначити загальне зростання і групи мікроорганізмів, які визначають інтенсивність розкладу рослинних решток у ґрунті (целюлозолітичні процеси), у середньому на 16,50%.

Таблиця 4. Структура мікробіоти ґрунту залежно від варіантів вирощування сої (середнє за 2023–2025 рр. (НД на метод випробувань М.Ц.ЛДР 7.2-02-13))

Еколого-функціональні групи мікроорганізмів (КУО/г, з перерахунком на сухий ґрунт)	Контрольний варіант (без біофумігаційної сидерації)	Варіант із застосуванням біофумігаційної сидерації
Олігонітрофільні та азотфіксувальні бактерії	2,75x10 ⁷	3,18x10 ⁷
Фосфатмобілізувальні бактерії	3,80x10 ⁶	4,45x10 ⁶
Стрептоміцети	5,50x10 ⁶	4,90x10 ⁶
Педотрофи	4,84x10 ⁷	5,90x10 ⁷
Амоніфікатори	2,49x10 ⁷	2,98x10 ⁷
Амілолітичні бактерії	6,16x10 ⁷	6,31 x10 ⁷
Оліготрофи	1,80x10 ⁷	1,62x10 ⁷
Мікроміцети	3,00x10 ⁵	2,51x10 ⁵
Целюлозолітичні бактерії	1,27x10 ⁴	1,40x10 ⁴
Целюлозолітичні мікроміцети	3,58x10 ⁴	4,25x10 ⁴
Нітрифікатори	8,80x10 ⁵	9,70x10 ⁵

З огляду на низку досліджень та висновків [26, с. 193–195; 35, с. 508–509; 37, с. 17–18], установлено загальне оздоровлення ґрунту та оптимізацію його мікробіологічної структури, що сприяє загальному підвищенню продуктивності ґрунту, а отже, і прогнозованому підвищенню рівня урожайності культур, під які здійснюватиметься процес біофумігаційної сидерації. Такі результати було підтверджено оцінками рівня урожайності сої на застосованих дослідних варіантах у 2023 та 2024 рр. (табл. 5). Для умов 2025 р. врожайність на момент написання статті ще не обліковувалася, і соя перебувала на феностадії молочної стиглості зерна у нижньому та середньому ярусах бобів.

Таблиця 5. Урожайність сої сорту Бетіната залежно від застосованих варіантів дослідів, 2023–2024 рр., т/га

Рік	Контрольний варіант (без біофумігаційної сидерації)	Варіант із застосуванням біофумігаційної сидерації	Приріст	
			т/га	%
2023	2,77	3,19	0,42	15,16
2024	2,54	2,85	0,31	12,20
НІР ₀₅	0,09	0,12	–	–

За результатами обліку врожайності сої варіант застосування біофумігаційної сидерації забезпечив середній приріст урожаю – 0,365 т/га (13,68% до контрольного варіанту).

Висновки. Таким чином, застосована система використання редьки олійної за проміжного літнього її вирощування, яка поєднує ефективні боки сидерації та біофумігації з досяжним середнім біофумігаційним потенціалом на рівні 86,71 моль/га у глюкозинолатному еквіваленті під час вирощування сої, дає змогу істотно знизити рівень забур'яненості її агроценозу в інтегральному виразі (кількість x вага) на 28,38%, оптимізувати мікробіологічну структуру ґрунту за загального зростання іммобілізуючих елементів живлення мікроорганізмів – на 15,8% за одночасного зниження сапрофітної мікрофлори на 20,37%. У підсумку позитивні багаточинні впливи на ґрунт та ценоз сої відобразилися у прирістній динаміці врожайності зерна сої у середньому на 13,7% у співставленні до контрольного варіанту без сидерації.

Список використаних джерел

1. ДСТУ ISO 10381–6–2001 Якість ґрунту. Відбір проб. Ч.6. Настанови щодо відбору, оброблення та зберігання ґрунту для дослідження аеробних мікробіологічних процесів у лабораторії (ISO 10381–6:1993, ІДТ). Київ : Держстандарт України. 2002. 6 с.
2. Методичні рекомендації з вивчення генетичних ресурсів зернобобових культур / Л.Н. Кобизьєва та ін. Харків, 2016. 84 с.
3. Цицюра Я.Г., Неїлик М.М., Дідур І.М., Поліщук М.І. Сидерація як базовий складник біологізації сучасних систем землеробства. Вінниця : Друк, 2022. 770 с.
4. Abdallah I., Yehia R., Kandil M.Ah. Biofumigation potential of Indian mustard (*Brassica juncea*) to manage *Rhizoctonia solani*. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*. 2020. Vol. 30. 99. <https://doi.org/10.1186/s41938-020-00297-y>
5. Ahmed A.K.N., Galaup B., Desplanques J., Dechamp-Guillaume G., Seassau C. Ecosystem Services Provided by Cover Crops and Biofumigation in Sunflower Cultivation. *Agronomy*. 2022. Vol. 12. 120. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010120>
6. Arroyo J.M., Soler J., Linares R., Palmero D. Strategies for Selecting Potentially Effective Biofumigant Species for Optimal Biofumigation Outcomes. *Agriculture*. 2025. Vol. 15. 147. <https://doi.org/10.3390/agriculture15020147>
7. Batistič L., Bohinc T., Trdan S. Biofumigation with *Brassica* Species and Their Derivatives: A Comprehensive Review of an Innovative Pest Control Strategy Targeting Wireworms (Coleoptera: Elateridae). *Agronomy*. 2025. Vol. 15. №4. 967. <https://doi.org/10.3390/agronomy15040967>
8. Brown C. Available Nutrients and Value for Manure from Various Livestock Types. Factsheet № 21077. AGDEX 538. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. Queen's Printer for Ontario. 2021, 10 p.
9. Bremmer J., Gonzalez-Martinez A., Jongeneel R., Huiting H., Stokkers R., Ruijs M. Impact Assessment of EC 2030 Green Deal Targets for Sustainable Crop Production. Wageningen Economic Research, 2021. 69 p.
10. Duff J., van Sprang C., O'Halloran J., Hall Z. Guide to Brassica Biofumigant Cover Crops Managing soilborne diseases in vegetable production systems. Horticulture Innovation through VG16068 Optimising cover cropping for the Australian vegetable industry. State of Queensland. Department of Agriculture and Fisheries. 2020. 40 p.
11. Edwards S., Ploeg A. Evaluation of 31 potential biofumigant brassicaceous plants as hosts for three meloidogyne species. *Journal of Nematology*. 2014. Vol. 46. № 3. P. 287–295.
12. ISO 9167:2019. Rapeseed and rapeseed meals. Determination of glucosinolates content. Method using high-performance liquid chromatography. Technical Committee: ISO/TC 34/SC 2 ICS: 67.200.20. 2019. 28 p.
13. Galaup B. Assessment of the potential of biotic regulation by Brassica cover-crops used as biofumigants. Case of *Verticillium dahliae* affecting Sunflower crop in southwestern France. Mster Thesis. Norwegian University of Life Science. 2018. 42 pp.
14. Gimsing A.L., Kirkegaard J.A. Glucosinolates and biofumigation: Fate of glucosinolates and their hydrolysis products in soil. *Phytochemistry Reviews*. 2009. Vol. 8. P. 299–310. <https://doi.org/10.1007/s11101-008-9105-5>
15. Gimsing A.L., Kirkegaard J.A. Glucosinolate and isothiocyanate concentration in soil following incorporation of Brassica biofumigants. *Soil Biology and Biochemistry*. 2006. Vol. 38. P. 2255–2264. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.01.024>
16. Kirkegaard J. Biofumigation for plant disease control—From the fundamentals to the farming system. In *Disease Control in Crops: Biological and Environmentally Friendly Approaches*; Wiley: Hoboken, NJ, USA. 2009. P. 172–195. <https://doi.org/10.1002/9781444312157.ch9>
17. Kirkegaard J., Matthiessen J. Developing and refining the biofumigation concept. *Agroindustria*. 2004. Vol. 3. P. 233–239.
18. Kirkegaard J.A., Sarwar M. Biofumigation potential of brassicas: I. Variation in glucosinolate profiles of diverse field-grown brassicas. *Plant and Soil*. 1998. Vol. 201. № 1. P. 71–89. <https://doi.org/10.1023/A:1004333230899>
19. Kirkegaard J.A., Sarwar M. Glucosinolate profiles of Australian canola (*Brassica napus annua* L.) and Indian mustard (*Brassica juncea* L.) cultivars: implications for biofumigation. *Australian Journal of Agricultural Science*. 1999. Vol. 50. P. 315–324. <https://doi.org/10.1071/A98124>
20. Lazzeri L., Leoni O., Manici L.M. Biocidal plant dried pellets for biofumigation. *Industrial Crops and Products*. 2004. Vol. 20. P. 59–65. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2003.12.018>
21. Lazzeri L., Malaguti L., Cinti S., Ugolini L., De Nicola G.R., Bagatta M., Patalano G. The Brassicaceae biofumigation system for plant cultivation and defense: An Italian twenty-year experience of study and application. *Acta Horticulturae*. 2013. Vol. 1005. P. 375–382. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.1005.44>
22. Lefebvre M. Impact of *Brassica juncea* L. biofumigation on annual weed ecology and population dynamic in organic soil. PhD Thesis. McGill University. Department of Plant Science. 2018. 182 p.
23. Mazur O.V., Zayka K.R., Yakovets V.I., Dovgopoliy V.S. Length of growing season and height of soybean plants depending on pre-sowing treatment of seeds and fertilizer. *Сільське господарство та лісівництво*. 2024. № 4 (35). P. 38–48. <https://doi.org/10.37128/2707-5826-2024-4-4>
24. Morris E.K., Fletcher R., Veresoglou S.D. Effective methods of biofumigation: A meta-analysis. *Plant Soil*. 2020. Vol. 446. P. 379–392. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04352-y>
25. Perniola O.S., Chorzempa S.E., Staltari S., Molina M. del C. Biofumigación con *Brassica juncea*: efecto sobre la flora arvense. *Revista De La Facultad De Agronomía*. 2019. Vol. 118. № 1. P. 25–35. <https://doi.org/10.24215/16699513e003>
26. Potgieter C., De Beer M., Claassens S. The effect of canola (*Brassica napus*) as a biofumigant on soil microbial communities and plant vitality: a pot study. *South African Journal of Plant and Soil*. 2013. Vol. 30. №4. P. 191–201. <https://doi.org/10.1080/02571862.2013.860491>
27. Rana S.S., Kumar S. Practical Manual – Principles and practices of weed management. Department of Agronomy, College of Agriculture, CSK Himachal Pradesh Krishi Vishvavidyalaya, Palampur. 2014, 77.
28. Santos CA dos, Abboud AC de S, Carmo MGF do. Biofumigation with species of the Brassicaceae family: a review. *Cienc Rural*. 2021. Vol. 51. №1. e20200440. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr2020040>
29. Snedecor G.W., Cochran W.G. Statistical Methods, 8th Edition. Wiley-Blackwell, 1991. 524 p.
30. Szczygłowska M., Piekarska A., Konieczka P., Namieśnik J. Use of Brassica plants in the phytoremediation and biofumigation processes. *International Journal of Molecular Sciences*. 2011. Vol. 12. 7760. <https://doi.org/10.3390/ijms12117760>

31. Technical Note TN735 Biofumigation to suppress pests, weeds and diseases. National Advice Hub. 2020. URL: <https://www.fas.scot/downloads/technical-note-tn735-biofumigation-to-suppress-pests-weeds-and-diseases/> (date of application: 08.09.2025).
32. Tsytsiura Y. Evaluation of Ecological Adaptability of Oilseed Radish (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.) Biopotential Realization in the System of Criteria for Multi-Service Cover Crop. *Journal of Ecological Engineering*. 2024. Vol. 25. № 7. P. 265–285. <https://doi.org/10.12911/22998993/188603>
33. Tsytsiura, Y. Ecological adaptive tactics of oil radish root formation at different terms of green manure application. *Journal of Ecological Engineering*. 2025. Vol. 26. № 9. P. 420–439. <https://doi.org/10.12911/22998993/205413>
34. Villalta O., Wite D., Riches D., Guiano J., Chandolu V., Scoble C., Donald C., Porter I., Mattner S. The Concentration of 2-Propenyl Glucosinolate in Biofumigant Crops Influences Their Anti-Fungal Activity (In-Vitro) against Soil-Borne Pathogens. *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*. 2016. Vol. 5. P. 38–45. <https://doi.org/10.4236/jacen.2016.51B006>
35. Wang Q., Ma Y., Yang H., Chang Z. Effect of biofumigation and chemical fumigation on soil microbial community structure and control of pepper *Phytophthora* blight. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2014. Vol. 30. P. 507–518. <https://doi.org/10.1007/s11274-013-1462-6>
36. Yim B., Hanschen F.S., Wrede A., Nitt H., Schreiner M., Smalla K. Winkelmann T. Effects of biofumigation using *Brassica juncea* and *Raphanus sativus* in comparison to disinfection using Basamid on apple plant growth and soil microbial communities at three field sites with replant disease. *Plant and Soil* 2016. Vol. 406. № 1/2. P. 389–408. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-2876-3>
37. Zachariah H. Potential of three brassica cover crops for biofumigation in the field and the relationship between soil myrosinase and biofumigation efficacy. PhD Thesis. Clemson University. TigerPrints. 1248. 2011. 136 p.
38. Zasada I.A., Ferris H. Nematode suppression with brassicaceous amendments: Application based upon glucosinolate profiles. *Soil Biology and Biochemistry*. 2004. Vol. 36. P. 1017–1024. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2003.12.014>

Tsytsyura Ya. G.

*Candidate of Agricultural Sciences,
Associate Professor at the Department of Agriculture, Soil Science and Agrochemistry,
Vinnytsia National Agrarian University
Vinnytsia, Ukraine*

E-mail: yaroslavtsytsyura@ukr.net

ORCID: 0000-0002-9167-833X

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF OIL RADISH GREEN MANURE APPLICATION BASED ON SOIL QUALITY CRITERIA WITHIN THE FRAMEWORK OF ITS AGROPHYSICAL AND HYDROPHYSICAL PARAMETERS

Abstract

The relevance and agrotechnological feasibility of biofumigation as part of an integrated system of green manuring for agricultural crops are considered and analyzed. The advantages of biofumigation technologies are outlined from the standpoint of their positive effects on soil properties, optimization of ecological-functional groups of microorganisms, the establishment of biological control over segetal vegetation in crop agrocenoses, and the resulting impact on crop yield potential. Particular emphasis is given to the advantages of biofumigation within green manuring systems using cruciferous cover crops, which are the most widespread in global biofumigation practices.

During the research period of 2023–2025, conducted under production conditions, the effectiveness of oil radish application in green manure technologies with an accompanying biofumigation effect was evaluated for soybean cultivation in addition to the baseline fertilization system adopted in the farm.

The green manure and biofumigation potential of oil radish was assessed considering the hydrothermal conditions of the green manure growth period, and conclusions were drawn regarding its effectiveness as a cover crop under unstable moisture conditions on podzolic chernozems. A wide range of recommended and approved methods was applied to evaluate the output of leaf-stem and root biomass, as well as the herbicidal and biofumigation potential of oil radish.

Based on the assessment of experimental data, achievable levels of weed suppression in soybean agrocenoses were determined across different weed groups by quantitative and biomass parameters. The dynamics of changes in soil microbiological structure were evaluated, taking into account useful, non-beneficial, and inert microbiota, along with the realization of soybean yield potential under the tested treatments.

The generalization of results demonstrated the feasibility of applying biofumigation-oriented green manuring with oil radish in soybean cultivation, combining yield enhancement with soil-conserving benefits through optimization of soil microbiological potential and reduction of segetal degradation.

Key words: biofumigation and green manure potential, soil microbiota structure, weed infestation level, crop.

References

1. DSTU ISO 10381–6–2001 Yakist igruntu. Vidbir prob. Ch.6. Nastanovy shchodo vidboru, obroblennia ta zberihannia igruntu dlia doslidzhennia aerobnykh mikrobiolohichnykh protsesiv u laboratorii (ISO 10381–6:1993, IDT) [DSTU ISO 10381–6–2001. Soil quality – Sampling – Part 6: Guidance on the collection, handling and storage of soil for the assessment of aerobic microbial processes in the laboratory (ISO 10381–6:1993, IDT)]. Kyiv, Derzhstandart Ukrainy. 2002. 6 p. [in Ukrainian].
2. Kobyzieva, L.N., Bezugla, O.M., Sylenko, S.I., Kolotylov, V.V., Sokol, T.V., Dokukina, K.I., Vasylenko, A.O., Bezuglyi, I.M., & Vus, N.O. (2016). Metodichni rekomendatsii z vyvchennia henetychnykh resursiv zernobobovykh kultur [Methodical

recommendations on the study of genetic resources of leguminous crops]. NAAN, Instytut roslinnictwa im. V.Ya. Yurieva. Kharkiv, 84 s. [in Ukrainian].

3. Tsytsiura, Ya.H., Neilyk, M.M., Didur, I.M., Polishchuk, M.I. (2022). Syderatsiia yak bazova skladova biolohizatsii suchasnykh system zemlerobstva. Monohrafiia [Green manure as a basic component of biologization of modern farming systems. Monograph]. Vinnytsia: Vydavets TOV «Druk», 2022. 770 s. [in Ukrainian].

4. Abdallah, I., Yehia, R., Kandil, M.Ah. (2020). Biofumigation potential of Indian mustard (*Brassica juncea*) to manage *Rhizoctonia solani*. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*. Vol. 30. 99. <https://doi.org/10.1186/s41938-020-00297-y> [in English].

5. Ahmed, A.K.N., Galaup, B., Desplanques, J., Dechamp-Guillaume, G., Seassau, C. (2022) Ecosystem Services Provided by Cover Crops and Biofumigation in Sunflower Cultivation. *Agronomy*. Vol. 12. 120. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010120> [in English].

6. Arroyo, J.M., Soler, J., Linares, R., Palmero, D. (2025). Strategies for Selecting Potentially Effective Biofumigant Species for Optimal Biofumigation Outcomes. *Agriculture*. Vol. 15. 147. <https://doi.org/10.3390/agriculture15020147> [in English].

7. Batistič, L., Bohinc, T., Trdan, S. (2025). Biofumigation with *Brassica* Species and Their Derivatives: A Comprehensive Review of an Innovative Pest Control Strategy Targeting Wireworms (Coleoptera: Elateridae). *Agronomy*. Vol. 15. № 4. 967. <https://doi.org/10.3390/agronomy15040967> [in English].

8. Brown, C. (2021). Available Nutrients and Value for Manure from Various Livestock Types. Factsheet № 21077. AGDEX 538. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. Queen's Printer for Ontario. 10 p. [in English].

9. Bremmer, J., Gonzalez-Martinez, A., Jongeneel, R., Huiting, H., Stokkers, R., Ruijs, M. (2021). Impact Assessment of EC 2030 Green Deal Targets for Sustainable Crop Production. Wageningen Economic Research, 69 p. [in English].

10. Duff, J., van Sprang, C., O'Halloran, J., Hall, Z. (2020). Guide to Brassica Biofumigant Cover Crops Managing soilborne diseases in vegetable production systems. Horticulture Innovation through VG16068 Optimising cover cropping for the Australian vegetable industry. State of Queensland. Department of Agriculture and Fisheries. 40 p. [in English].

11. Edwards, S., Ploeg, A. (2014). Evaluation of 31 potential biofumigant brassicaceous plants as hosts for three meloidogyne species. *Journal of Nematology*. Vol. 46. № 3. P. 287–295. [in English].

12. ISO 9167:2019. (2019). Rapeseed and rapeseed meals. Determination of glucosinolates content. Method using high-performance liquid chromatography. Technical Committee: ISO/TC 34/SC 2 ICS: 67.200.20. 28 p. [in English].

13. Galaup, B. (2018). Assessment of the potential of biotic regulation by Brassica cover-crops used as biofumigants. Case of *Verticillium dahliae* affecting Sunflower crop in southwestern France. Mster Thesis. Norwegian University of Life Science. 42 pp. [in English].

14. Gimsing, A.L., Kirkegaard, J.A. (2009). Glucosinolates and biofumigation: Fate of glucosinolates and their hydrolysis products in soil. *Phytochemistry Reviews*. Vol. 8. P. 299–310. <https://doi.org/10.1007/s11101-008-9105-5> [in English].

15. Gimsing, A.L., Kirkegaard, J.A. (2006). Glucosinolate and isothiocyanate concentration in soil following incorporation of Brassica biofumigants. *Soil Biology and Biochemistry*. Vol. 38. P. 2255–2264. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.01.024> [in English].

16. Kirkegaard, J. (2009). Biofumigation for plant disease control—From the fundamentals to the farming system. In *Disease Control in Crops: Biological and Environmentally Friendly Approaches*; Wiley: Hoboken, NJ, USA. P. 172–195. <https://doi.org/10.1002/9781444312157.ch9> [in English].

17. Kirkegaard, J., Matthiessen, J. (2004). Developing and refining the biofumigation concept. *Agroindustria*. Vol. 3. P. 233–239. [in English].

18. Kirkegaard, J.A., Sarwar, M. (1998). Biofumigation potential of brassicas: I. Variation in glucosinolate profiles of diverse field-grown brassicas. *Plant and Soil*. Vol. 201. № 1. P. 71–89. <https://doi.org/10.1023/A:1004333230899> [in English].

19. Kirkegaard, J.A., Sarwar, M. (1999). Glucosinolate profiles of Australian canola (*Brassica napus annua* L.) and Indian mustard (*Brassica juncea* L.) cultivars: implications for biofumigation. *Australian Journal of Agricultural Science*. Vol. 50. P. 315–324. <https://doi.org/10.1071/A98124> [in English].

20. Lazzeri, L., Leoni, O., Manici, L.M. (2004). Biocidal plant dried pellets for biofumigation. *Industrial Crops and Products*. Vol. 20. P. 59–65. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2003.12.018> [in English].

21. Lazzeri, L., Malaguti, L., Cinti, S., Ugolini, L., De Nicola, G.R., Bagatta, M., Patalano, G. (2013). The Brassicaceae biofumigation system for plant cultivation and defense: An Italian twenty-year experience of study and application. *Acta Horticulturae*. Vol. 1005. P. 375–382. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.1005.44> [in English].

22. Lefebvre, M. (2018). Impact of Brassica juncea L. biofumigation on annual weed ecology and population dynamic in organic soil. PhD Thesis. McGill University. Department of Plant Science. 182 p. [in English].

23. Mazur, O.V., Zayka, K.R., Yakovets, V.I., Dovgopoliy, V.S. (2024). Length of growing season and height of soybean plants depending on pre-sowing treatment of seeds and fertilizer. [Silske hospodarstvo ta lisivnytstvo – Agriculture and Forestry]. № 4(35). P. 38–48. <https://doi.org/10.37128/2707-5826-2024-4-4> [in English].

24. Morris, E.K., Fletcher, R., Veresoglou, S.D. (2020). Effective methods of biofumigation: A meta-analysis. *Plant Soil*. Vol. 446. P. 379–392. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04352-y> [in English].

25. Perniola, O.S., Chorzempa, S.E., Staltari, S., Molina, M. del C. (2019). Biofumigación con Brassica juncea: efecto sobre la flora arvense. *Revista De La Facultad De Agronomía*. Vol. 118. № 1. P. 25–35. <https://doi.org/10.24215/16699513e003> [in English].

26. Potgieter, C., De Beer, M., Claassens, S. (2013). The effect of canola (*Brassica napus*) as a biofumigant on soil microbial communities and plant vitality: a pot study. *South African Journal of Plant and Soil*. Vol. 30. № 4. P. 191–201. <https://doi.org/10.1080/02571862.2013.860491> [in English].

27. Rana, S.S., Kumar, S. (2014). Practical Manual – Principles and practices of weed management. Department of Agronomy, College of Agriculture, CSK Himachal Pradesh Krishi Vishvavidyalaya, Palampur. 77. [in English].

28. Santos, C.A. dos, Abboud, A.C. de S., Carmo, M.G.F. do. (2021). Biofumigation with species of the Brassicaceae family: a review. *Cienc Rural*. Vol. 51. № 1. e20200440. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr2020040> [in English].

29. Snedecor, G.W., Cochran, W.G. (1991). Statistical Methods, 8th Edition. Wiley-Blackwell, 524 p. [in English].

30. Szczygłowska, M., Piekarska, A., Konieczka, P., Namieśnik, J. (2011). Use of Brassica plants in the phytoremediation and biofumigation processes. *International Journal of Molecular Sciences*. Vol. 12. 7760. <https://doi.org/10.3390/ijms12117760> [in English].
31. Technical Note TN735 (2020). Biofumigation to suppress pests, weeds and diseases. National Advice Hub. URL: <https://www.fas.scot/downloads/technical-note-tn735-biofumigation-to-suppress-pests-weeds-and-diseases/> (date of application 08.09.2025). [in English].
32. Tsytsiura, Y. (2024). Evaluation of Ecological Adaptability of Oilseed Radish (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.) Biopotential Realization in the System of Criteria for Multi-Service Cover Crop. *Journal of Ecological Engineering*. Vol. 25. № 7. P. 265–285. <https://doi.org/10.12911/22998993/188603> [in English].
33. Tsytsiura, Y. (2025). Ecological adaptive tactics of oil radish root formation at different terms of green manure application. *Journal of Ecological Engineering*. Vol. 26. № 9. P. 420–439. <https://doi.org/10.12911/22998993/205413> [in English].
34. Villalta, O., Wite, D., Riches, D., Guiano, J., Chandolu, V., Scoble, C., Donald, C., Porter, I., Mattner, S. (2016). The Concentration of 2-Propenyl Glucosinolate in Biofumigant Crops Influences Their Anti-Fungal Activity (In-Vitro) against Soil-Borne Pathogens. *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*. Vol. 5. P. 38–45. <https://doi.org/10.4236/jacen.2016.51B006> [in English].
35. Wang, Q., Ma, Y., Yang, H., Chang, Z. (2014). Effect of biofumigation and chemical fumigation on soil microbial community structure and control of pepper *Phytophthora blight*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. Vol. 30. P. 507–518. <https://doi.org/10.1007/s11274-013-1462-6> [in English].
36. Yim, B., Hanschen, F.S., Wrede, A., Nitt, H., Schreiner, M., Smalla, K., Winkelmann, T. (2016). Effects of biofumigation using Brassica juncea and Raphanus sativus in comparison to disinfection using Basamid on apple plant growth and soil microbial communities at three field sites with replant disease. *Plant and Soil* 2016. Vol. 406. № 1/2. P. 389–408. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-2876-3> [in English].
37. Zachariah, H. (2011). Potential of three brassica cover crops for biofumigation in the field and the relationship between soil myrosinase and biofumigation efficacy. PhD Thesis. Clemson University. TigerPrints. 1248. 136 p. [in English].
38. Zasada, I.A., Ferris, H. (2004). Nematode suppression with brassicaceous amendments: Application based upon glucosinolate profiles. *Soil Biology and Biochemistry*. Vol. 36. P. 1017–1024. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2003.12.014> [in English].

Отримано: 24.09.2025

Рекомендовано: 30.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025