



УДК 635.15:631.5

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.13.2025.31>

ПОТЕНЦІАЛ І ЕФЕКТИВНІСТЬ БІОФУМІГАЦІЇ ҐРУНТУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ РЕДЬКИ ОЛІЙНОЇ В СИСТЕМІ ЛІТНЬОЇ ПРОМІЖНОЇ СИДЕРАЦІЇ

Я. Г. Цицюра¹

Обґрунтовано ефективність та значущість застосування біофумігації ґрунту завдяки використанню сидеральних культур. Сформульовано основні переваги цього агротехнологічного заходу з огляду на комплексність у забезпеченні зниження ґрунтової, істотного обмеження сегетальної рослинності та ґрунтових патогенів, підсилення мікробіологічного потенціалу ґрунту тощо. Мета передбачала дослідження ефективності та доцільності біофумігації завдяки використанню як одно-видового варіанту редьки олійної, вирощуваної як сидерат проміжного (літнього) періоду вегетації. За багаторічний цикл досліджень (2020–2024 роки) визначено основні складники ефективності використання редьки олійної як одновидового біофуміганту на сірих лісових ґрунтах за такими показниками, як: надземна та коренева біопродуктивність, здатність до реалізації біопродуктивного потенціалу за динамічної зміни кліматичних умов періоду оцінювання, глюкозинолатний потенціал листостеблової та кореневої маси, антисегетальний потенціал загального та внутрішньовидового типу, вплив на мікробіологічну структуру ґрунту тощо.

За результатами досліджень визнано доцільним у плані реалізації концепції ґрунтовідновлення та ґрунтозбереження за застосування компонентів і складників природного біоорганічного походження технології біофумігації у сівозміні, який передбачає систематичне використання в сівозміні редьки олійної (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.), вирощеної за літнього строку сівби на неудобреному фоні з нормою висіву 2,5 млн/га схожих насінин звичайним рядковим способом, скошеної у фазі цвітіння (ВВСН 64–67) з одночасним подрібненням на відрізки завдовжки 3–4 см та заробленої у ґрунт шлямхом інтенсивного ротаційного дискового перемішування із ґрунтом на глибину 14–16 см з подальшим біоконсервуванням на 5–7 діб через укриття поверхні ґрунту білим агроволокном звичайного геотекстильного типу щільністю 30–50 г/м². Застосування такого технологічного варіанту біофумігації дозволило в сівозміні за п'ятирічний цикл обліків досягти зниження показника кількісної забур'яненості на 41,16%, вагової – на 33,35%, за зниження потенційної засміченості ґрунту в шарі 0–30 см на 17,28% порівняно з контролем. Встановлено також позитивний вплив даної технології на зміну структури мікробіологічної структури ґрунту: збільшення загальної кількості мікроорганізмів на 18,51%, амоніфікаторів – на 27,27%, фосформобілізуючих бактерій – на 10,53%, актиноміцетів – на 50,0% за одночасного зниження кількості оліготрофів на 22,23%, грибів – на 13,56%.

Ключові слова: глюкозинолатний потенціал, рівень забур'яненості, потенційна засміченість ґрунту, мікробіологічна структура ґрунтового комплексу.

¹ кандидат сільськогосподарських наук,
доцент кафедри землеробства, ґрунтознавства та агрохімії
(Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця)
e-mail: yaroslavtsytsyura@ukr.net
ORCID: 0000-0002-9167-833X

POTENTIAL AND EFFECTIVENESS OF SOIL BIOFUMIGATION THROUGH THE USE OF OILSEED RADISH IN A SUMMER INTERMEDIATE GREEN MANURE SYSTEM

Y. G. Tsytsiura

The effectiveness and significance of soil biofumigation through the use of green manure crops have been substantiated. The main advantages of this agrotechnological practice have been outlined, emphasizing its comprehensive role in reducing soil fatigue, significantly suppressing weed infestation and soil-borne pathogens, and enhancing the soil's microbiological potential. The aim of the study was to assess the efficiency and feasibility of biofumigation using oilseed radish as a single-species variant cultivated as a green manure crop during the intermediate (summer) growing period.

Based on a multi-year research cycle (2020–2024), the study identifies the main components of the effectiveness of oilseed radish as a monovarietal biofumigant on grey forest soils, focusing on the following indicators: aboveground and root bioproductivity, realization of bioproductive potential under dynamic climate change conditions, glucosinolate potential of the leaf-stem and root biomass, overall and intraspecific allelopathic potential, and influence on soil microbial structure.

Research findings support the feasibility of applying biofumigation technology within crop rotations for soil restoration and conservation, using components of natural bio-organic origin. The proposed system involves the systematic use of oilseed radish grown as a summer-sown green manure crop under unfertilized conditions, with a seeding rate of 2,5 million viable seeds per hectare, sown in conventional rows. Plants were mown at flowering stage (BBCH 64–67), chopped into 3–4 cm pieces, and incorporated into the soil via intensive rotary disc mixing to a depth of 14–16 cm, followed by bioconservation for 5–7 days using surface coverage with white agrotexile (geotexile type, 30–50 g/m² density).

This technological variant of biofumigation, over a five-year accounting cycle, resulted in a 41,16% reduction in weed infestation density, a 33,35% decrease in total weed biomass, and a 17,28% reduction in the potential weed seed bank in the 0–30 cm soil layer, compared to the control. A positive impact was also observed on the microbiological structure of the soil: total microbial counts increased by 18,51%, ammonifiers by 27,27%, phosphorus-mobilizing bacteria by 10,53%, and actinomycetes by 50,0%, while the counts of oligotrophs and fungi decreased by 22,23% and 13,56%, respectively.

Key words: glucosinolate potential, weed infestation level, potential weed seedbank, microbiological structure of the soil complex.

Вступ

Біофумігація є інноваційним напрямом у системах органічного землеробства та важливим супутнім складником сидеральних систем удобрення. Вона ґрунтується на доведених базових принципах алелопатичної, антипатогенної та ентомологічно регулюючої дії біохімічних похідних, отриманих у результаті розкладу у ґрунтовому профілі рослинної біомаси різновидового походження (Duff et al., 2020). Термін виник зовсім недавно та був уведений у загальне користування із середини минулого десятиліття. Нині біофумігація розглядається як базова основа всіх агротехнологій біоорганічного спрямування, спрямованих на зниження ґрунтової деградації, забезпечення збереження потенціалу родючості ґрунтів, запобігання процесам ґрунтовтоми та фітотоксичності ґрунтового покриву, якісне посилення фіторемідаційних технологій, та як вагома альтернатива класичним системам мінерального удобрення на ґрунтах із низьким потенціалом ґрунтової родючості (Kirkegaard & Sarwar, 2020). Технологія біо-

фумігації 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 (Villalta et al., 2016; Galaup, 2018; Ahmed et al., 2022).

Водночас підходи до реалізації біофумігації базуються на двох основних технологічних рішеннях: внесенні спеціальних компонентів і речовин, які володіють вираженим біофумігаційним ефектом і є загалом безпечними для ґрунту (Potgieter et al., 2013), та забезпечення реалізації біофумігаційних процесів у ґрунтовому профілі завдяки прямій сидерації в різних її технологічних варіантах (Zachariah, 2011). Водночас пряма сидерація розглядається як більш доцільне та бажане агротехнологічне рішення для

забезпечення процесів біофумігації (Yim et al., 2016).

Сидерація – відомий і широкоапробований спосіб природного варіанту біоциклічного способу колообігу біогенних елементів у системі ґрунт – довкілля, що базується на функціонуванні ґрунтового середовища як складної системи, для якої найбільш характерними є реутилізація та іммобілізація свіжої органічної маси та похідних різновидових рослинних відходів, що гарантує ґрунтозбереження завдяки нормалізації фітоценологічних взаємозв'язків в агроценозі, зниження рівня екологічного й агрохімічного тиску на фоні одночасного ефективного поповнення ґрунтового профілю органікою та цілою низкою біогенних елементів і фітоактивних сполук. Це додатково сприяє істотному зниженню потреби в дорогих мінеральних добривах і компенсує потребу в дефіцитній натеper органіці тваринного походження – гноєві (Kirkegaard & Matthiessen, 2004; Lefebvre, 2018; Perniola et al., 2019).

Варто зазначити, що біофумігаційний потенціал культур, які застосовуються як сидерати, є різним як за реалізацією, так і за ефективністю. Це потребує пошуку відповідних видів сидератів чи їх сумішей для забезпечення ефективного процесу сидерації, гарантування агрономічно доцільного рівня супутнього біофумігаційного ефекту (Kirkegaard & Sarwar, 1999; Santos et al., 2021; Batistić et al., 2025).

Щодо цього варто зауважити, що хрестоцвітні 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, завдяки вмісту глюкозинолатів у ній, володіють вираженими потенційними біофумігаційними властивостями, які опосередковано досить широко використовуються у практиці загального оздоровлення ґрунту (Gimsing & Kirkegaard, 2006; Edwards & Ploeg, 2014; Abdallah et al., 2020; Patil et al., 2020).

З позиції все більш широкого залучення редьки олійної як культури багатоцільового використання, з високим адаптивним потенціалом (Tsytsiura, 2024a, 2024b), важливо було дослідити її ефективність як біофумігаційного агента в сидераційних технологіях застосування на сірих лісових ґрунтах в умовах нестійкого зволоження.

Матеріал і методи

Дослідження проводили впродовж 2020–2024 рр. в умовах дослідного поля Вінницького національного аграрного університету, на сірих лісових ґрунтах. Ґрунтовий покрив дослідних ділянок мав такі агрохімічні показники: уміст гумусу – 2,68%, легкогідролізованого азоту – 81,5 мг/кг ґрунту, рухомого фосфору – 176,1 мг/кг ґрунту, обмінного калію – 110,8 мг/кг ґрунту, рН_{KCl} – 5,8.

Використовували систему 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 (ВВСН 64–67), коли вміст глюкозинолатів у рослині досягав свого максимуму. Вирощену масу підкошували з одночасним подрібненням на відрізки завдовжки у 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 укриття поверхні ґрунту після загортання сидерата білим агроволокном (звичайного типу геотекстиль зі щільністю 30–50 г/м²). Агроволокно застосовували для збереження біофумігантного ефекту в результаті розкладення глюкозинолатів у листостебловій масі редьки олійної та оптимізації початкових процесів розкладу маси у ґрунті. Контрольним був варіант без застосування сидерації. Облікова площа ділянки 25 м². Повторність досліду чотириразова. Даний спосіб сидерації з позиції головного чинника, який вивчали, досліджували під такі культури сівозміни дослідного поля: кукурудзу на зерно, соняшник, нут, сою.

Облік надземної маси рослин проводили у фазі цвітіння методом пробних ділянок (1 м²) (по 4 в кожній повторності, зважування на лабораторних вагах (WALCOM LB3002 (±0,01 г)). Показник сформованої кореневої біомаси визначали на основі застосування стандартних підходів методу мікромонолітів (Bublitz et al., 2022). Вміст сухої речовини (далі – СР) у надземній і кореневій масі рослин визначали методом висушування до постійної маси за 105°C і озолення за 550°C.

Вміст глюкозинолатів у листостебловій і кореневій біомасі рослин редьки олійної визначали відповідно до ISO 9167:2019 (2019 р.).

Мікробіологічний потенціал ґрунту з позиції класифікуючих видів мікроорганізмів

визначали на підставі стандартної методики культивування витяжки із ґрунту на різних ґрунтових середовищах із наступною ознаково-класифікуючою ідентифікацією на основі чітких ознак вирощеної культури (відповідно до (Barillot et al., 2013)).

Для обліку бур'янів за кількісними та фітоценологічними параметрами застосовували стандартну методику Європейської асоціації гербологів (EWRS), що ухвалена для застосування в Україні (Rana & Kumar, 2014).

Статистичну обробку отриманих експериментальних даних проведено відповідно до стандартних методів (Wong, 2018) за допомогою програмних пакетів "Ekel" та "Statistica 10".

Результати

Гідротермічні умови періоду досліджень підтвердили належність території до умов нестійкого зволоження помірного континентального типу (табл. 1). Виходячи з характерного для зони досліджень середньобаторічного показника варіювання суми опадів на рівні 24,3%, суми опадів на рівні 17,8% та відносної вологості повітря на рівні 15,9%, показники періоду досліджень варто схарактеризувати як період з нестійким зволоженням, з оптимумом показника для умов 2022 р. та з мінімальним режимом оптимальності для умов 2024 р.

Адаптивний потенціал редьки олійної за проміжного літнього сидераційного використання підтверджено результатами зіставлення сформованої загальної біопродуктивності рослин на фоні мінімальності спостереженого гідротермічного режиму (табл. 2). Зокрема, рівень детермінації сформованої листостеблової маси прямо залежав за характером формування у значенні 52–64% від суми опадів та 18,7–39,6% від відносної вологості, на противагу оберненій детермінації у значенні 25,9–37,8% від середньодобової температури.

Наявність різниці між 100% факторним формуванням і реальними рівнями залежності на середньому рівні 56,5% (на підставі (Wong, 2018)) підтверджує наявність механізмів пристосування рослин редьки олійної до різнострокового сидерального використання в літній період за загального скорочення довжини світлового дня.

Сформована листостеблова сидеральна маса редьки олійної на період досягнення максимального біофумігаційного потенціалу на фазу цвітіння (ВВСН 64–67) різнилася за роками залежно від параметрів гідротермічного режиму періоду її вегетації

і коливалась від 9,49 до 24,77 т/га (табл. 2). У підсумку за п'ятирічний період даний показник становив у сирій масі 16,69 т/га (за міжрічного варіювання 38,45%), у сухій речовині – 2,56 т/га (32,95%). Отриманий потенціал оцінено як високий, беручи до уваги досяжні рівні продуктивності інших видів хрестоцвітних у зоні досліджень (як-от гірчиця біла, ріпак ярий, суріпиця яра, озимий ріпак за сидерального використання) в інтервалі надземної біомаси 7,5–20,4 т/га (1,96–3,19 т/га у сухій речовині). З позиції формування кореневої біомаси редька олійна продемонструвала також високий потенціал продуктивності з показником на рівні середньобаторічних даних для традиційно використовуваної в Україні гірчиці білої. Варто також зазначити позитивну властивість проміжного сидерального застосування редьки олійної з позиції показника продуктивності її кореневої системи у значенні співвідношення сформованої надземної та кореневої біомаси. Так, у середньому за період досліджень даний показник був на рівні 3,00 для показника сформованої сирової речовини та 2,01 для показника сформованої сухої речовини. Такі значення відповідають найбільш продуктивним сидеральним культурам різних ботанічних груп і дозволяють віднести редьку олійну до культури з потенціалом комбінованого біофумігаційного потенціалу з позиції застосування як надземної, так і кореневої біомаси.

Оцінений біофуміганційний потенціал редьки олійної за сумарним умістом глюкозинолатів у листостебловій і кореневій масі також підтвердив ефективність її застосування як біофуміганту (табл. 3). Критерій умісту глюкозинолатів є головним і вирішальним у концепції формування біофумігаційного потенціалу сидеральних культур, оскільки саме ці сполуки несуть основне навантаження з позиції реалізації основ ґрунтової біофумігації. Установлено, що ці сполуки беруть участь у формуванні стресових реакцій рослин на абіотичні чинники. Їхній інтенсивний ріст мав високі рівні достовірної кореляції зі збільшенням загального стресу вегетаційного періоду за кліматичними параметрами. Це особливо важливо для проміжних культур, які часто вирощуються в літньо-осінній період зі зростанням стресових умов навколишнього середовища. Глюкозинолати є також основними компонентами з позиції регуляції бактеріальної інфекції ґрунту, формування його алелопатичного потенціалу та прямої

обмежувальної гербостатичної дії (Sennett et al., 2021; Walker et al., 2022). Водночас доведено, що рівень концентрації глюкозинолатів вище 12 мкмоль/г сухої речовини формує належні передумови для ініціювання ефективного процесу біофумігації під час розкладання рослинної маси у ґрунті (Gimsing & Kirkegaard, 1998; Hanschen et al., 2015; Duff et al., 2020).

Виходячи з отриманих даних щодо середнього вмісту глюкозинолатів у листостебловій і кореневій біомасі редьки олійної – 19,95 мкмоль/г сухої речовини та 17,67 мкмоль/г сухої речовини відповідно, робимо висновок, що редька олійна мала високий потенціал для біофумігаційних технологій. Цей потенціал загалом для рослини оцінено на рівні 72,76 моль/га. Позитивним є і високий вміст глюкозинолатів і у сформованій кореневій біомасі, що дозволяє рекомендувати редьку олійну з позиції ґрунтової біофумігації завдяки використанню лише її корневих решток. З позиції оцінювання продуктивності формування кореневої біомаси (див. табл. 2) це дозволить досягнути біофумігаційної продуктивності за вмістом глюкозинолатів на рівні 21–32 моль/га.

Для порівняння варто зауважити, що інтервал 60–105 моль/га був досягнутий за використання різних видів гірчиці (гірчиця біла (*Sinapis alba*), гірчиця ефіоп-

ська (*Brassica carinata*), гірчиця індійська (*Brassica juncea*), гірчиця кормова (*Brassica napus*), гірчиця чорна (*Brassica nigra*)) у чистих посівах або в різних сумішах (Kirkegaard & Sarwar, 1998).

Цей результат позитивно корелює з дослідженням (Duff et al., 2020). Відзначено ефективний рівень вмісту GSL для досягнення множинних цілей біофумігації ґрунту сидератами (тобто ефективності реалізації основних завдань біофумігації ґрунту завдяки сидеральній масі) за весняного та літнього посіву залежно від виду хрестоцвітих рослин у діапазоні 30–105 моль/га.

За результатами тривалого оцінювання доведено ефективність застосування редьки олійної у варіантах біофумігації ґрунту за використання сидеральної маси редьки олійної щодо контролю рівня забур'яненості у відповідних ланках культур у сівоzmіні (табл. 4).

За результатами багаторічного оцінювання, застосування технології біофумігації забезпечило істотно нижчу забур'яненість наступних культур у сівоzmіні. Відмічено середньобагаторічний показник зниження кількісної забур'яненості у значенні 41,16%, а показника вагової забур'яненості – 33,35%.

Зазначимо, що застосування біофумігаційної сидеральної технології за використання редьки олійної позитивно вплинуло

Таблиця 1

Основні складники гідротермічного режиму періоду вегетації рослин-сидератів, 2020–2024 рр.

Роки та періоди оцінювання VII–XII/I–IV	За період				
	Показник середньодобової температури повітря, °C	Загальна сума активних температур, °C	Сума опадів, мм	Відносна вологість повітря, %	Загальний індекс зволоження, мм/°C
2020/2021 рр.	9,17	2 689,7	656,4	77,4	0,244
2021/2022 рр.	7,66	2 329,3	481,2	78,5	0,207
2022/2023 рр.	8,41	2 546,8	855,5	78,1	0,336
2023/2024 рр.	10,05	3 056,5	747,9	76,8	0,245

Таблиця 2

Загальна біопродуктивність редьки олійної за літнього сидерального використання на фазу цвітіння (BVCH 64–67), 2020–2024 рр.

Показники	2020 р.	2021 р.	2022 р.	2023 р.	2024 р.	НІР _{0,5}
Сформована сира листостеблова маса, т/га	11,29	16,22	24,77	21,39	9,77	1,53
Уміст сухої речовини в листостебловій масі, %	16,08	16,83	13,43	15,75	15,86	0,19
Сформована листостеблова маса в сухій речовині, т/га	1,82	2,73	3,33	3,37	1,55	0,31
Сформована сира коренева маса, т/га	3,09	6,49	8,03	7,33	2,84	0,72
Уміст сухої речовини в кореневій масі, %	22,65	23,27	21,92	23,47	23,94	0,11
Сформована коренева маса в сухій речовині, т/га	0,70	1,51	1,76	1,72	0,68	0,17

й на зменшення та загальну зміну структури видового забур'янення наступних за біофумігацією культур. Так, загальне зниження частки ярої ранньої групи бур'янів у середньобагаторічному вимірі в розрізі проаналізованих агроценозів сільськогосподарських культур становило 49,55% у кількісному та 34,52% у ваговому виразі.

Для інших груп бур'янів дана редукція становила: для пізньої ярої групи – 41,01 та 34,23%, зимуючих – 39,58 і 15,41%, для багаторічної групи – 40,53 та 28,29% відповідно. За біофумігації змінюється структура співвідношення різних біологічних груп сегетальної рослинності з домінуванням ярої пізньої групи.

Таблиця 3

Глюкозинолатний потенціал листостеблової та кореневої біомаси редьки олійної, 2020–2024 рр.

Показники	2020 р.	2021 р.	2022 р.	2023 р.	2024 р.	НІР _{0.5}
Уміст глюкозинолатів у надземній біомасі, мкмоль / г сухої речовини	19,75	21,53	17,17	20,09	21,19	0,41
Уміст глюкозинолатів у кореневій біомасі, мкмоль / г сухої речовини	17,16	18,78	15,26	18,00	19,11	1,12
Вихід глюкозинолатів із надземною біомасою, моль/га	36,00	58,81	57,23	67,74	32,84	0,33
Вихід глюкозинолатів із кореневою біомасою, моль/га	12,01	28,36	26,86	30,96	12,99	0,28
Загальний вихід глюкозинолатів зі сформованою біомасою рослини, моль/га	48,01	87,17	84,09	98,70	45,83	0,31

Таблиця 4

Вплив застосування проміжної сидерації редькою олійною на рівень забур'яненості таких сільськогосподарських культур (на дату до застосування гербіцидів), 2020–2024 рр.

Варіант	Одиниці обліку	Культури після біофумігації				
		2020 р.	2021 р.	2022 р.	2023 р.	2024 р.
		Соняшник	Соя	Нут	Кукурудза	Соя
Контроль	шт./м ²	27,2	21,5	29,3	28,8	22,7
	г/м ²	424,9	275,4	494,2	421,7	389,7
Біофумігація	шт./м ²	16,4	12,2	14,6	18,5	14,5
	г/м ²	291,7	224,8	261,4	277,9	281,3
НІР _{0.5} шт./м ²		2,7	4,5	4,1	3,2	3,5
НІР _{0.5} г/м ²		33,5	37,7	37,5	48,7	35,9
Контроль						
Ярі ранні	шт./м ²	3,3	1,8	1,7	3,1	1,2
	г/м ²	67,8	31,7	43,9	60,7	29,7
Ярі пізні	шт./м ²	17,8	14,6	21,3	15,9	13,8
	г/м ²	223,9	94,5	293,9	209,6	205,8
Зимуючі	шт./м ²	1,5	1,7	2,1	2,9	1,4
	г/м ²	25,9	30,3	46,2	34,7	22,5
Багаторічні	шт./м ²	4,6	3,4	5,2	6,9	6,3
	г/м ²	107,3	68,3	110,2	116,7	131,7
НІР _{0.5} шт./м ²		2,7	1,8	3,0	4,2	2,7
НІР _{0.5} г/м ²		32,5	22,4	39,2	42,3	37,2
Біофумігація						
Ярі ранні	шт./м ²	1,9	0,7	1,0	1,2	0,8
	г/м ²	48,7	28,4	30,5	24,8	20,7

Продовження таблиці 4

Варіант	Одиниці обліку	Культури після біофумігації				
		2020 р.	2021 р.	2022 р.	2023 р.	2024 р.
		Соняшник	Соя	Нут	Кукурудза	Соя
Ярі пізні	шт./м ²	11,3	8,3	9,5	10,3	9,8
	г/м ²	155,4	116,1	123,8	121,4	159,2
Зимуючі	шт./м ²	0,5	1,1	0,9	2,5	0,8
	г/м ²	16,9	35,6	24,4	40,7	17,4
Багаторічні	шт./м ²	2,8	2,1	3,2	4,5	3,1
	г/м ²	70,7	54,7	82,7	91,0	84,0
НІР ₀₅ , шт./м ²		3,5	2,4	2,9	3,2	3,1
НІР ₀₅ , г/м ²		41,9	27,1	35,8	40,8	44,9

Таблиця 5

Потенційна засміченість ґрунту на початку вегетаційного періоду за використання сидеральної маси редьки олійної як біофумігаційного компонента, середнє за 2020–2024 рр., млн шт./га

Варіант	Шар ґрунту, см								
	0–5		5–10		10–20		20–30		0–30
	млн шт./га	% до всього	млн шт./га	% до всього	млн шт./га	% до всього	млн шт./га	% до всього	усього, млн шт./га
Без сидерата (контроль)	19,3	16,5	20,2	17,3	37,3	31,9	40,1	34,3	116,9
Біофумігація	11,2	11,6	15,8	16,3	33,5	34,6	36,2	37,4	96,7
НІР ₀₅	0,3	–	0,4	–	1,1	–	1,4	–	1,2

Таблиця 6

Вплив біофумігації редькою олійною на мікрофлору сірого лісового ґрунту (середнє за 2020–2024 рр. для шару 0–30 см), млн куо/г абс. сух. ґрунту

Варіант досліджу	Загальна кількість мікроорганізмів (ПГА)	Бактерії, що використовують мін. азот (КАА)	Амоніфікатори (МПА)	Оліготрофи (ГА)	Фосформобілізуючі (середовище Муромцева)	Актиноміцети (КАА)	Гриби, тис. куо/г
Контроль	2,7	5,6	2,2	1,8	1,9	0,4	94,4
Біофумігація	4,0	6,9	3,4	1,0	4,8	1,0	71,3
НІР ₀₅	1,1	0,5	1,1	0,4	1,7	0,5	11,8

Підтверджено також високий позитивний ефект застосування біофумігації ґрунту за використання сидеральної маси редьки олійної за літнього строку сівби й на показник потенційної засміченості ґрунту на початок вегетаційного періоду (табл. 5).

Використання редьки олійної як сидерального компонента біофумігації забезпечило в середньому за п'ятирічний цикл досліджень зниження потенційної засміченості ґрунту в шарі 0–30 см на 17,28% порівняно з контролем. Максимальний ефект зни-

ження відмічено для глибини ґрунтового профілю 0–5 см – 41,97%.

Встановлено позитивний вплив біофумігації на структуру мікрофлори ґрунту (табл. 6). Так, загальна кількість мікроорганізмів зросла на 18,51%, за зростання амоніфікаторів на 27,27%, фосформобілізуєчих бактерій – на 10,53%, актиноміцетів – в 1,5 раза.

За цих же умов виявлено зниження кількості оліготрофів на 22,23% та кількості грибів на 13,56%. Отже, завдяки біофумігації досягнуто істотне поліпшення співвідношення між корисною та інертною мікрофлорою ґрунту.

У результуючому підсумку змінено на більш позитивний загальний скринінг мікробіологічного ґрунтового потенціалу з позиції обмеження сапрофітної і паразитарної мікрофлори та формування передумов для оптимізації процесів рослинної іммобілізації сполук азоту, фосфору та калію, формування позитивного балансу між динамічними процесами нітрифікації та амоніфікації, рециклінгу в доступності макро- та мікроелементів у ґрунтовому профілі (особливо в товщі 0–30 см). Водночас обмеженість розвитку сапрофітної мікрофлори сприяє загальному оздоровленню ґрунту з позиції наявності в ньому резервуючих форм патогенної мікрофлори.

Обговорення

З огляду на те, що біофумігаційний потенціал відповідних видів рослин залежить передусім від їхнього біопродуктивного потенціалу, який формується у процесі вегетативного розвитку (Zachariah, 2011; Yan et al., 2013), редька олійна з рівнем загальної біопродуктивності в сухій речовині на рівні 3,83 т/га засвідчила високий потенціал щодо її використання в системі біофумігаційних технологій проміжного (літнього) типу формування.

З позиції оцінювання досягнутого рівня виходу надземної та кореневої біомаси варто зауважити, що в дослідженні (Bhogal et al., 2019) технологічний інтервал урожайності біомаси редьки олійної коливався від 15 до 45 т/га залежно від ґрунтово-кліматичних умов. Згідно з дослідженням (Couédel et al., 2018), редьку олійну класифікують як високоврожайну покривну культуру для умов достатнього зволоження. Низка дослідників відзначають її достатній рівень адаптивності для вирощування за різними проміжними технологічними схемами з різними строками сівби, аж до 15 серпня, із середнім рівнем біопродуктивності вище

за 15 т/га (Abdallah et al., 2020; Duff et al., 2020; Campbell et al., 2024; Batistić et al., 2025). Для умов нестійкого зволоження врожайність надземної біомаси таких культур, як гірчиця біла, ріпак ярий, редька кормова (var. Tillage), редька просапна (редька дайкон), була в межах 12–27 т/га. Для озимого ріпаку (за використання його біомаси в ранньолітній період) урожайність надземної біомаси становила 25–60 т/га. Утворення підземної (кореневої) біомаси для цієї ж групи культур становило 5–15 та 12–25 т/га відповідно. З огляду на ці результати, для умов нестійкого зволоження на неудолюбному фоні редька олійна є ефективним елементом біофумігаційних технологій за використання найбільш поширених у даних технологіях хрестоцвітих видів рослин.

Стосовно глюкозинолатного потенціалу редьки олійної, за вказаним показником дана культура продемонструвала високий потенціал з позиції хімічного складника біофумігаційних перетворень рослинної біомаси у ґрунтовому профілі. Зокрема, у різних дослідженнях редьки олійної на стадії цвітіння рівень глюкозинолатів коливався в межах 9–41 мкмоль/г сухої речовини і був в 1,2–1,5 раза вищим у суцвіттях порівняно з листям і стеблом (Gimsing & Kirkegaard, 2006; Duff et al., 2020). Для гірчиці білої середній вміст глюкозинолатів (у середньому на рослину) для фази цвітіння був у межах 11–56 мкмоль/г – 1DM (Kirkegaard & Sarwar, 1999; Lefebvre, 2018; Perniola et al., 2019). Для ярого ріпаку вміст GSL становив 9–44 мкмоль/г сухої речовини (Potgieter et al., 2013; Galaup, 2018; Patil et al., 2020). Для озимого ріпаку цей показник був на рівні 8–51 мкмоль/г сухої речовини (Kirkegaard & Sarwar, 1999; Santos et al., 2021). Із цих позицій листостеблова та коренева біомаса редьки олійної має деякі переваги щодо таких традиційних культур, які широко практикуються в міжнародній практиці, як гірчиця біла та ярий ріпак.

У світовій практиці сегетально регулюючий ефект від застосування біофумігації має бінарний складник, зумовлений як безпосереднім ефектом впливу на чисельність і рясність бур'янів у системі їх провокації до проростання у варіантах саме літньої сидерації (Bajagain et al., 2024), так і безпосереднім пригніченням бур'янів на стадії проростання або ж у процесі інціальних стадій росту через аелопатичну конкуренцію та безпосередньо внаслідок цього термінацію наступних стадій фенорозвитку (Ahmed et

al., 2022; Tsytsiura, 2024a). Установлено, що ефект гербоконкуренції сидератів має виражений видовий характер і залежить також від строку сидерації, продуктивності сформованої надземної та кореневої біомаси, фенологічних аспектів сидераційного використання рослин, типу та рівня забур'яненості поля до сидерації (Tsytsiura, 2024b). Що стосується специфікації антисегетальної ефективності хрестоцвітих видів рослин, то найбільш ефективним було їх використання для обмеження чисельності ярої групи бур'янів (Rana et al., 2014; Lefebvre, 2018) за інтервального значення зниження на рівні від 17,5 до 63,7% для актуального типу забур'яненості та на рівні від 20,7 до 55,4% для потенційного її типу, залежно від ґрунтово-кліматичної зони, строків і видів біофумігації сидерального типу, видів агроценозів відповідних сільськогосподарських культур. Отримані результати в даних дослідженнях позитивно співвідносяться із вказаними результатами та додатково доводять ефективність біофумігації за однокомпонентної участі редьки олійної в системі ґрунтової біофумігації сидерального типу.

За останній період підтверджено в різних дослідженнях позитивну дію біофумігації за використання таких культур, як гірчиця біла та ріпак ярий (озимий), на зміну структури мікробіологічного комплексу ґрунтів (Barillot et al., 2013; Potgieter et al., 2013; Hanschen et al., 2015; Yim et al., 2016; Walker et al., 2022). Зокрема, зазначено позитивний ріст корисної мікрофлори симбіотичного (загальний приріст у структурі до 5,3–7,9%), азот-трансформувального (приріст на рівні 5–8%) та фосфор-мобілізуючого типу (приріст на рівні 8,3–12,7%) за використання технологій біофумігації хрестоцвітими видами рослин сидератів. З огляду на зміни у структурі мікробіологічного комплексу сірих лісових ґрунтів за умов застосування біофумігаційних варіантів технологій на основі однокомпонентного застосування редьки олійної, вони позитивно корелюють з подібними дослідженнями інших авторів на традицій-

них культурах хрестоцвітої групи, гірчиці білій і ріпаках. Такі результати додаткового доводять позитивний вплив застосування редьки олійної на мікробіологічне портфоліо ґрунтів з позиції його оптимізації. Такий варіант з успіхом може бути використаний для систем реабілітації ґрунтів, особливо з позиції негативного впливу за істотного зниження позитивної мікрофлори та розвитку її патогенної та сапрофітної часток.

Висновки

З огляду на представлені результати та зроблені проміжні висновки, редька олійна за досяжного середньобагаторічного біопотенціалу на рівні 3,8 т/га сухої речовини на сірих лісових ґрунтах в умовах нестійкого зволоження є самодостатнім кандидатом для застосування в біофумігаційних технологіях сидераційного спрямування. Дане твердження позитивно узгоджується із загальним глюकोзинолатним потенціалом рослинної та кореневої біомаси редьки олійної в середньобагаторічному вимірі на рівні 72,76 моль/га, що відповідає рекомендованому інтервалу застосування хрестоцвітих видів рослин для біофумігації в інтервалі від 30 до 105 моль/га. Доведено також антисегетальний складник біофумігації на основі редьки олійної за загального сіквесту (усереднено для всіх видових груп бур'янів) кількісної забур'яненості на рівні вище за 41%, вагової – на рівні вище за 35%, потенційної – на рівні вище за 17% (для шару ґрунту 0–30 см).

Установлено якісні позитивні зміни структури ґрунтового мікробіологічного комплексу: ріст мікробіологічного загального потенціалу до 15–20%, зокрема: амоніфікаторів – до 27%, фосформобілізуючих мікроорганізмів – до 11%, актиноміцетів – на рівні 50%.

Отже, редька олійна з успіхом може бути застосована для реалізації базових і похідних агротехнологічних завдань технологій біофумігації на сірих лісових ґрунтах на недобреному фоні за умов нестійкого режиму зволоження.

Список використаної літератури

- 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. P. 99. <https://doi.org/10.1186/s41938-020-00297-y>.
- 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. P. 120. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010120>.
- Bajagain A., Lehnhoff E.A., Creamer R., Steiner R., Schutte B.J. Timing Termination of a Biofumigant Cover Crop for Weed Suppression in Chile Pepper. *HortTechnology* 2024. Vol. 34. P. 142–152. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH05318-23>.

- Barillot C.D.C., Sarde C.O., Bert V., Tarnaud E., Cochet N. A standardized method for the sampling of rhizosphere and rhizoplane soil bacteria associated to a herbaceous root system. *Annals of Microbiology*. 2013. Vol. 63. P. 471–476. <https://doi.org/10.1007/s13213-012-0491-y>.
- 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. P. 967. <https://doi.org/10.3390/agronomy15040967>.
- Bhogal A., White C., Morris N. Project Report № 620 Maxi Cover Crop: Maximising the benefits from cover crops through species selection and crop management. *AHDB Cereals & Oilseeds is a part of the Agriculture and Horticulture Development Board (AHDB)*. 2019. 69 p.
- Bublitz T.A., Kemper R., Müller P., Kautz T., Döring T.F., Athmann M. Relating Profile Wall Root-Length Density Estimates to Monolith Root-Length Density Measurements of Cover Crops. *Agronomy*. 2022. Vol. 12. P. 48. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010048>.
- Campbell J.W., Rand T.A., West N.M., Morphew A., Allen B.L., Jabro J., Dangi S.R. Pollinators and Other Beneficial Insects Within Two Brassicaceous Oilseeds and a Cover Crop Mix Under Evaluation as Fallow Surrogates for Dryland Production Systems of the Northern Great Plains. *Journal of the Kansas Entomological Society*. 2024. Vol. 96. P. 78–92. <https://doi.org/10.2317/0022-8567-96.3.78>.
- Couëdel A., Alletto L., Tribouillois H., Justes E. Cover crop crucifer-legume mixtures provide effective nitrate catch crop and nitrogen green manure ecosystem services. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2018. Vol. 254. P. 50–59.
- 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.
- 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.
- 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 p.
- 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>.
- 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>.
- Hanschen F.S., Yim B., Winkelmann T., Smalla K., Schreiner M. Degradation of biofumigant isothiocyanates and allyl glucosinolate in soil and their effects on the microbial community composition. *PloS one*. 2015. Vol. 10. P. e0132931. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132931>.
- 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.
- Kirkegaard J., Matthiessen, J. Developing and refining the biofumigation concept. *Agroindustria*. 2004. Vol. 3. P. 233–239.
- 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>.
- 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>.
- 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.
- Patil J.A., Kumar A., Yadav S., Verma K.K. Nematicidal effect of cruciferous bio-fumigants against the root-knot nematode, *Meloidogyne incognita* infesting okra. *Journal of Nematology*. 2020. Vol. 52. P. 1–7. <https://doi.org/10.21307/jofnem-2020-080>.
- 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>.
- 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>.
- 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. 85 p.

Santos C.A. dos., Abboud A.C. de S., Carmo M.G.F. Biofumigation with species of the Brassicaceae family: a review. *Ciência Rural*. 2021. Vol. 51. № 1. P. e20200440. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr2020040>.

Sennett L., Burton D.L., Goyer C., Zebarth B.J. Influence of chemical fumigation and biofumigation on soil nitrogen cycling processes and nitrifier and denitrifier abundance. *Soil Biology and Biochemistry*. 2021. Vol. 162. P. 108421. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108421>.

Tsytsiura Y. Potential of oilseed radish (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.) as a multi-service cover crop (MSCC). *Agronomy Research*. 2024a. Vol. 22. № 2. P. 1026–1070. <https://doi.org/10.15159/AR.24.086>.

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*. 2024b. Vol. 25. Iss. 7. P. 265–285. <https://doi.org/10.12911/22998993/188603>.

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>.

Walker B.A., Powell S.M., Tegg R.S., Doyle R.B., Hunt I.G., Wilson C.R. Soil microbial community dynamics during ryegrass green manuring and brassica biofumigation. *Applied Soil Ecology*. 2022. Vol. 179. P. 104600. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104600>.

Wong J. Handbook of statistical analysis and data mining applications. Cambridge : Academic Press, 2018. 589 p. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-06451-4>.

Yan D., Wang Q., Mao L., Li W., Xie H., Guo M., Cao A. Quantification of the effects of various soil fumigation treatments on nitrogen mineralization and nitrification in laboratory incubation and field studies. *Chemosphere*. 2013. Vol. 90. P. 1210–1215. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.09.041>.

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>.

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. Tiger Prints. 1248. 2011. 136 p.

References

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*, 30, 99. <https://doi.org/10.1186/s41938-020-00297-y> [in English].

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*, 12, 120. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010120> [in English].

Bajagain, A., Lehnhoff, E.A., Creamer, R., Steiner, R., & Schutte, B.J. (2024). Timing Termination of a Biofumigant Cover Crop for Weed Suppression in Chile Pepper. *Hort Technology*, 34, 142–152. <http://doi.org/10.21273/HORTTECH05318-23> [in English].

Barillot, C.D.C., Sarde, C.O., Bert, V., Tarnaud, E., & Cochet, N.A. (2013). standardized method for the sampling of rhizosphere and rhizoplan soil bacteria associated to a herbaceous root system. *Annals of Microbiology*, 63, 471–476. <https://doi.org/10.1007/s13213-012-0491-y> [in English].

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*, 15 (4), 967. <https://doi.org/10.3390/agronomy15040967> [in English].

Bhogal, A., White, C., & Morris, N. (2019). Project Report № 620 Maxi Cover Crop: Maximising the benefits from cover crops through species selection and crop management. AHDB Cereals & Oilseeds is a part of the Agriculture and Horticulture Development Board (AHDB), 69 pp. [in English].

Bublitz, T.A., Kemper, R., Müller, P., Kautz, T., Döring, T.F., & Athmann, M. (2022). Relating Profile Wall Root-Length Density Estimates to Monolith Root-Length Density Measurements of Cover Crops. *Agronomy*, 12, 48. <http://doi.org/10.3390/agronomy12010048> [in English].

- Campbell, J.W., Rand, T.A., West, N.M., Morphey, A., Allen, B.L., Jabro, J., & Dangi, S.R. (2024). Pollinators and Other Beneficial Insects Within Two Brassicaceous Oilseeds and a Cover Crop Mix Under Evaluation as Fallow Surrogates for Dryland Production Systems of the Northern Great Plains. *Journal of the Kansas Entomological Society*, 96, 78–92. <https://doi.org/10.2317/0022-8567-96.3.78> [in English].
- Couëdel, A., Alletto, L., Tribouillois, H., & Justes, E. (2018). Cover crop crucifer-legume mixtures provide effective nitrate catch crop and nitrogen green manure ecosystem services. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 254, 50–59. [in English].
- 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].
- Edwards, S., & Ploeg, A. (2014). Evaluation of 31 potential biofumigant brassicaceous plants as hosts for three meloidogyne species. *Journal of Nematology*, 46 (3), 287–295 [in English].
- 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].
- Gimsing, A.L., & Kirkegaard, J.A. (2006). Glucosinolate and isothiocyanate concentration in soil following incorporation of Brassica biofumigants. *Soil Biology and Biochemistry*, 38, 2255–2264. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.01.024> [in English].
- Gimsing, A.L., & Kirkegaard, J.A. (2009). Glucosinolates and biofumigation: fate of glucosinolates and their hydrolysis products in soil. *Phytochemistry Reviews*, 8, 299–310. <https://doi.org/10.1007/s11101-008-9105-5> [in English].
- Hanschen, F.S., Yim, B., Winkelmann, T., Smalla, K., & Schreiner, M. (2015). Degradation of biofumigant isothiocyanates and allyl glucosinolate in soil and their effects on the microbial community composition. *PloS one*, 10, e0132931. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132931> [in English].
- 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 pp. [in English].
- Kirkegaard, J., & Matthiessen, J. (2004). Developing and refining the biofumigation concept. *Agroindustria*, 3, 233–239 [in English].
- Kirkegaard, J.A., & Sarwar, M. (1998). Biofumigation potential of brassicas: I. Variation in glucosinolate profiles of diverse field-grown brassicas. *Plant and Soil*, 201 (1), 71–89. <https://doi.org/10.1023/A:1004333230899> [in English].
- 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*, 50, 315–324. <https://doi.org/10.1071/A98124> [in English].
- 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 pp. [in English].
- Patil, J.A., Kumar, A., Yadav, S., & Verma, K.K. (2020). Nematicidal effect of cruciferous biofumigants against the root-knot nematode, *Meloidogyne incognita* infesting okra. *Journal of Nematology*, 52, 1–7. <https://doi.org/10.21307/jofnem-2020-080> [in English].
- 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*, 118 (1), 25–35. <https://doi.org/10.24215/16699513e003> [in English].
- 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*, 30 (4), 191–201, <https://doi.org/10.1080/02571862.2013.860491> [in English].
- 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, 85 pp. [in English].
- Santos, C.A. dos., Abboud, A.C. de S., & Carmo, M.G.F. (2021). Biofumigation with species of the Brassicaceae family: a review. *Ciência Rural*, 51 (1), e20200440. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr2020040> [in English].

Sennett, L., Burton, D.L., Goyer, C., & Zebarth, B.J. (2021). Influence of chemical fumigation and biofumigation on soil nitrogen cycling processes and nitrifier and denitrifier abundance. *Soil Biology and Biochemistry*, 162, 108421. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108421> [in English].

Tsytsiura, Y. (2024a). Potential of oilseed radish (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.) as a multi-service cover crop (MSCC). *Agronomy Research*, 22 (2), 1026–1070. <https://doi.org/10.15159/AR.24.086> [in English].

Tsytsiura, Y. (2024b) 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*, 25 (7), 265–285. <https://doi.org/10.12911/22998993/188603> [in English].

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*, 5, 38–45 <https://doi.org/10.4236/jacen.2016.51B006> [in English].

Walker, B.A., Powell, S.M., Tegg, R.S., Doyle, R.B., Hunt, I.G., & Wilson, C.R. (2022). Soil microbial community dynamics during ryegrass green manuring and brassica biofumigation. *Applied Soil Ecology*, 179, 104600. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104600> [in English].

Wong, J. (2018). Handbook of statistical analysis and data mining applications. Cambridge, Academic Press, 589 pp. <http://doi.org/10.1016/C2012-0-06451-4> [in English].

Yan, D., Wang, Q., Mao, L., Li, W., Xie, H., Guo, M., & Cao, A. (2013). Quantification of the effects of various soil fumigation treatments on nitrogen mineralization and nitrification in laboratory incubation and field studies. *Chemosphere*, 90, 1210–1215. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.09.041> [in English].

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*, 406 (1/2), 389–408. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-2876-3> [in English].

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. Tiger Prints, 1248, 136 pp. [in English].

Отримано: 18.07.2025

Прийнято: 25.08.2025

Опубліковано: 17.10.2025

