

**Я. Г. Цицюра**

кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
доцент кафедри землеробства, ґрунтознавства та агрохімії,
Вінницький національний аграрний університет (м. Вінниця, Україна)
E-mail: yaroslavtsytsyura@ukr.net
orcid.org/0000-0002-9167-833X

ОЦІНКА ФІТОТОКСИЧНОСТІ ТА МІКРОБІОЛОГІЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ҐРУНТУ ЗА СИСТЕМАТИЧНОГО СИДЕРАЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ РЕДЬКИ ОЛІЙНОЇ У СІВОЗМІНІ

Стаття присвячена всебічному дослідженню особливостей впливу сидерального використання редьки олійної у сівозміні зі сталою частотою на формування показників фітотоксичності ґрунту та його мікробіологічний потенціал з метою формування оптимального агротехнологічного регламенту такого варіанту сидерації та визначення доцільності та можливості застосування одновидового та однотипового її варіанту на сірих лісових ґрунтах в умовах нестійкого зволоження.

За тривалий період 2014–2025 рр. досліджено динаміку формування фітотоксичності ґрунту в сидеральних ланках вирощування сільськогосподарських культур за трьома критеріями з позиції формування схожості та маси рослин тест-культури а також інтегрального показника умовних кумаринових одиниць. Це дозволило ідентифікувати наростання фітотоксичності ґрунту за систематичного використання редьки олійної як варіант акумулятивного характеру з піковим значенням фітотоксичного ефекту (ФЕ) ґрунту у середньому для шару ґрунту 0–30 см на кінець циклу оцінки на рівні 11,20% ФЕ, а за критерієм формування маси рослин тест-культури – 12,93% ФЕ. Встановлені параметри та ідентифікована динаміка формування фітотоксичності ґрунту дозволяють прогнозувати оптимальний варіант тривалості сидерального беззмінного використання редьки олійної у періодичних ланках сидерації у сівозміні.

Доведено також позитивний і сталий вплив редьки олійної у якості сидерату на поліпшення як мікробіологічного потенціалу сірого лісового ґрунту з приростом мікробної його маси на 38,52% у порівнянні до вихідного значення, так і структури еколого-функціональні групи ґрунтових мікроорганізмів. За тривалий період сидерації (2014–2024 рр.) з періодичністю раз на два роки на тому ж полі визначено приріст з обліком на кінцеву дату частки азотфіксувальних бактерій ґрунту на 33,07%, фосфатмобілізуючих бактерій на 29,81%, педотрофів на 35,17%, амоніфікаторів на 23,49%, амілолітичних бактерій на 29,34%, нітрифікаторів на 37,33%, целюлозолітичних бактерій на 43,54%.

Ключові слова: редька олійна, проміжна сидерація, фітотоксичний ефект, біоіндикація ґрунту, мікробіотичний комплекс ґрунту, еколого-функціональні групи ґрунтових мікроорганізмів.

Ya. H. Tsytura

Ph.D. in Agricultural Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Agriculture, Soil Science and Agrochemistry,
Vinnytsia National Agrarian University (Vinnytsia, Ukraine)
E-mail: yaroslavtsytsyura@ukr.net
orcid.org/0000-0002-9167-833X

ASSESSMENT OF SOIL PHYTOTOXICITY AND MICROBIOLOGICAL POTENTIAL UNDER SYSTEMATIC GREEN MANURING WITH OILSEED RADISH IN CROP ROTATION

The article is devoted to a comprehensive study of the influence of oilseed radish as a green manure crop in crop rotation with stable frequency on the formation of soil phytotoxicity indicators and its microbiological potential. The purpose was to establish an optimal agrotechnological regulation of this green manuring variant and to determine the feasibility and effectiveness of its single-species and uniform application on gray forest soils under conditions of unstable moisture.

Over the long-term period of 2014–2025, the dynamics of soil phytotoxicity formation in green manure links of crop cultivation were studied using three criteria: germination of the test crop, plant biomass formation, and the integrated index of conditional coumarin units. This allowed identification of the cumulative nature of soil phytotoxicity increase under systematic use of oilseed radish, with a peak phytotoxic effect (PE) for the 0–30 cm soil layer at the end of the assessment cycle averaging 11.20% PE, while for the criterion of plant biomass formation of the test culture – 12.93% PE. The determined parameters and the identified dynamics of soil phytotoxicity formation allow forecasting of the optimal duration of continuous oilseed radish green manuring in periodic crop rotation links.

The study also proved the positive and stable effect of oilseed radish as a green manure on improving both the microbiological potential of gray forest soil, with a 38.52% increase in microbial biomass compared to the initial value, and the structure

of ecological-functional groups of soil microorganisms. Over the long-term period of green manuring (2014–2024) with a frequency of once every two years on the same field, increases were recorded at the final date in the shares of the following soil microorganisms: nitrogen-fixing bacteria – by 33.07%, phosphate-mobilizing bacteria – by 29.81%, pedotrophs – by 35.17%, ammonifiers – by 23.49%, amylolytic bacteria – by 29.34%, nitrifiers – by 37.33%, and cellulolytic bacteria – by 43.54%.

Key words: oilseed radish, intermediate green manuring, phytotoxic effect, soil bioindication, soil microbiotic complex, ecological-functional groups of soil microorganisms.

Постановка проблеми. Сидерація з огляду на стійкі тенденції переходу на біоорганічні технології вирощування сільськогосподарських культур, дефіцит органічних добрив та необхідність забезпечення збалансованих органо-мінеральних систем удобрення – важливий і актуальний варіант агротехнологічного укладу використання земель сільськогосподарського призначення [1, 31, 32]. Застосування сидератів за відповідних агротехнологічних умов дозволяє отримати у середньостроковому періоді позитивні ефекти з позиції оптимізації агрофізичних властивостей ґрунту [23], акумуляції органічного вуглецю та запобігання процесам дегуміфікації [40, 41, 46], істотного зниження рівня потенційної та актуальної забур'яненості поля [22, 44], поліпшення мікробіологічної структури мікробіоти ґрунту [19, 39], зниження ризиків розвитку ґрунтових фітопатогенів [30] та в цілому сприяє стійким процесам ґрунтозбереження [38, 45].

Разом із тим, сидерація має і певні ризики. Ці ризики пов'язані з алелопатичним впливом на наступні культури у сівозміні у після сидеральний період їх вирощування [51, 52], формуванням тотожних фітопатогенних та ентомофагових комплексів за одновидового розміщення сидератів у схемі чергування культур [47], можливого негативного впливу за рахунок порушення технологічного регламенту сидерації (строки, глибина загортання, ступінь подрібнення, якість загортання тощо) [53], а також вплив гідротермічних умов періоду сидерації (виражена аридність періоду або ж навпаки надлишкове волого забезпечення) [56].

Окремо слід відмітити ризики пов'язані з питанням фітотоксичності ґрунту та супутніх процесів мікробіологічної його структури за систематичної та тривалої сидерації одновидового характеру у сівозміні [43]. Вказаний аспект може мати явні ознаки відклику у довготривалому періоді оцінки за рахунок поступової акумуляції як відповідних біохімічних компонентів, які накопичуються як проміжні продукти розкладу сидеральної маси в ґрунтового профілі, так і за рахунок супутньої зміни видової структури мікробіологічного комплексу ґрунту [27]. Такі негативні аспекти комбінованого поєднання у науковій практиці отримали загальне визначення «ґрунтовтоми» [10].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Фітотоксичність ґрунту розглядається як можливий негативний вплив на ростові та фізіологічні процеси рослин за рахунок наявності у ґрунті відповідних хімічних компонентів – продуктів життєдіяльності попередніх вирощуваних видів рослин, хімічних сполук отриманих у результаті ґрунтового розкладу різного виду рослинних решток або ж комплексної взаємодії

вказаних речовин із мікробіотою ґрунту, застосованих хімічних компонентів удобрення або ж діючих речовин пестицидів [2, 3, 8]. В науковій практиці фітотоксичність ґрунту розглядається також з позиції алелопатичної взаємодії рослин за рахунок накопичення специфічних компонентів хімічної взаємодії різних видів рослин через ґрунтове середовище названих колінами [9, 24, 34] та суміжних процесів їх взаємодії з мікробіологічним комплексом ґрунтового профілю за видоспецифічних механізмів стимуляції чи супресії окремих їх видів [5]. З позиції власне сидеральних технологій вказані продукти є результатом розкладу сидеральної маси, які крім того можуть впливати на структуру мікробіологічного комплексу, особливо тих груп мікроорганізмів, які безпосередньо приймають участь у біотрансформації рослинної маси, особливо за варіанту частого застосування одного і того ж виду рослини-сидерату [8, 13]. Спираючись на вище викладене, важливим питанням є дослідження питання фітотоксичності ґрунту, мікробіологічної його структури та окремих супутніх ознак пов'язаних із цим за використання тривалого сидерального утримання ґрунту з одно-видовим тотожним сидеральним компонентом.

Слід також відмітити, що відповідно до довготривалого вивчення редьки олійної (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.) з позиції полікритерійного потенціалу її сільськогосподарського використання її віднесено до високоефективного сидерального компонента удобрення для умов Лісостепу правобережного з стійким та нестійким режимами зволоження територій [57, 58].

Метою статті є дослідження фітотоксичності та супутніх процесів мікробіологічної якості ґрунту за систематичного застосування редьки олійної у якості проміжного (літнього) сидерального компонента біоорганічного удобрення у сівозміні у рамках виконання етапів державної тематики «Розробка екологоорієнтованих технологій вирощування біоенергетичних культур для забезпечення енергонеалежності та ґрунтозбереження задля формування кліматичної нейтральності» (№ держреєстрації 0124U000483).

Методика дослідження. Дослідження питань поставлених на вивчення проводили впродовж 2014–2025 рр. на дослідному полі Вінницького національного аграрного університету (N 49°11'31", E 28°22'16") на сірих лісових ґрунтах. Агрохімічний потенціал поля мав такі середньобаторічні показники: вміст гумусу 2,68% легкогідролізованого азоту 81,5 мг/кг ґрунту, рухомого фосфору 176,1 мг/кг ґрунту, обмінного калію 110,8 мг/кг ґрунту, pH_{KCl} 5,8.

Схема досліду ставила за мету порівняння двох варіантів технології – контрольної без

сидерації та дослідної за проміжного літнього використання редьки олійної у якості сидерату на одній і тій же площі з черговістю раз на два роки у повній ланці сівозміни за відсутності інших видів хрестоцвітних. На дослідних ділянках було застосовано лише сидерат для уникнення синергічної чи депресуючої дії на чинники вивчення мінеральних компонентів та інших можливих органічних компонентів удобрення відповідно до рекомендованої методології вивчення фітотоксичності та ґрунтовтоми [10]. Контрольний варіант дослідження – варіант без сидерації. Повна схема дослідів представлена в табл. 1.

Схема досліджень включала рендомізоване розміщення дослідних ділянок при чотирьохразовій повторності виділеною тотожною за розміщенням на полі обліковою ділянкою площею 25 м². За весь період було використано один і той же сорт редьки олійної Журавка за сидерального припосівного конструювання ценозу, яке передбачало кількісну норму висіву 2,5 млн насінин на га з міжряддям 15 см відразу після збирання попередньої культури з проміжним комбінованим обробітком ґрунту на глибину 12–16 см. Фенологічно сидерацію редьки олійної у всі роки проводили на фазу її цвітіння (ВВСН 64–67) із загортанням у ґрунт на глибину 14–16 см важкими дисковими боронами (БДН-2.4) після попереднього підкошування з подрібненням.

Фенологічний розвиток рослин редьки олійної визначався відповідно до рекомендованої міжнародної шкали ВВСН [54].

Визначення показника сидеральної продуктивності проводили за рівнем сформованої надземної та кореневої сидеральної маси відповідно до [32] при застосуванні методу облікових майданчиків площею 1 м² у чотирьохразовій повторності та методу мікромонологів (власне для обліку кореневої біомаси) (методика повністю деталізована

у попередній публікації [57]). При цьому вміст сухої речовини у надземній та кореневій масі рослин визначали шляхом висушування до постійної маси при 105 °С та озолення при 550 °С [7, 60].

Проби ґрунту для лабораторного оцінки фітотоксичності відбиралися з шарів ґрунту 0–10, 10–20 та 20–30 см відповідно до стандартної методики [15, 16]. Процес лабораторної біоіндикації фіто токсичності ґрунту на відібраних попередньо в полі зразках відповідно до схеми дослідів проводили відповідно до загальних методичних рекомендацій у нормативному порядку відповідних національних стандартів [11, 17, 18] у трьохразовій повторності. Як біологічний тест-об'єкт було обрано крес-салат (*Lepidium sativum* L.).

Для результуючої оцінки рівня фітотоксичності ґрунту застосовувався метод біотестування, а також один із варіантів адаптації біотестування, який застосовують у практиці алелопатичних досліджень – метод умовних кумаринових одиниць (УКО) [8]. Одна умовна кумаринова одиниця відповідає еталонному розчину природного інгібітора росту кумарину (2Н-хромен-2-он або 2Н-1-бензопіран-2-он) – лактону о-гідроксикоричної кислоти – у концентрації 1 г/л. Перерахунок схожості та характеру морфологічного розвитку рослин крес-салату на ґрунтових субстратах (відібраних із шарів ґрунту 0–10, 10–20 та 20–30 см) з різною тривалістю сидерації редьки олійної в умовні кумаринові одиниці здійснювався на основі регресійних рівнянь, побудованих відповідно до шкали схожості насіння даного виду рослин, наведеної у Гродзинського [8, 9].

Вихідними показниками для калькуляції УКО було застосовано визначені параметри фітотоксичного впливу ґрунтового середовища на схожість насіння та ріст рослин крес-салату на підставі розрахунку фітотоксичного ефекту (ФЕ, %) (формула 1):

Таблиця 1

Повна схема дослідів з вивчення ефективності застосування систематичної сидерації редькою олійною у сівозміні, 2014–2025 рр.

Варіант дослідів	
Моніторинг 2014 рік	
Абсолютний контроль	Вихідні дані по дослідних параметрах ґрунту на початок закладення дослідів
Моніторинг 2019 рік	
Контроль I	Облік дослідних параметрів ґрунту після чергування культур на ділянці: сорго зернове (2014) – ярий ячмінь (2015) – горох (2016) – ярий ячмінь (2017) – соя (2018);
Сидерація I	Облік дослідних параметрів ґрунту при застосуванні проміжної сидерації (сидерат – редька олійна) у схемі чергування їх на ділянці сорго зернове (2014) – ярий ячмінь (2015) – горох (2016) – ярий ячмінь (2017) – соя (2018)) під культури: сорго зернове (2014) – горох (2016) – соя (2018)
Моніторинг 2024 та 2025 рік	
Контроль II	Облік дослідних параметрів ґрунту після чергування культур на ділянці: сорго зернове (2014) – ярий ячмінь (2015) – горох (2016) – ярий ячмінь (2017) – соя (2018) – яра пшениця (2019) – сосяшник (2020) – озимий горох (2021) – нут (2022) – ярий ячмінь (2023) – кукурудза на зерно (2024)
Сидерація II	Облік дослідних параметрів ґрунту при застосуванні проміжної сидерації (сидерат – редька олійна) у схемі чергування їх на ділянці сорго зернове (2014) – ярий ячмінь (2015) – горох (2016) – ярий ячмінь (2017) – соя (2018) – яра пшениця (2019) – сосяшник (2020) – озимий горох (2021) – нут (2022) – ярий ячмінь (2023) – кукурудза на зерно (2024)) під культури: сорго зернове (2014) – горох (2016) – соя (2018) – сосяшник (2020) – нут (2022) – кукурудза на зерно (2024)

$$\Phi E = \frac{(M_k - M_s)}{M_k} \times 100 \quad (1)$$

M_k – схожість насіння, маса цілих рослин у контрольному варіанті, %, г (мг);

M_s – схожість насіння, маса цілих рослин у варіанті сидерації, %, г (мг).

Оцінка рівня фітотоксичності проведена за рекомендованою шкалою [2] у таблиці 2. Оцінка відповідних показників згідно програми досліджень була проведена у всі роки застосування сидерації відповідно до схеми дослідів табл. 1). Відбір ґрунтових зразків проводили щороку на одних і тих же ділянках весною при досягненні ґрунтом стану фізичної стиглості для оцінки реальної фітотоксичності ґрунту перед початком вирощування відповідної культури після завершення первинного циклу імплементації сидеральної маси ґрунтом (відповідно до рекомендацій [11]). За контроль було використано ґрунт у ці роки з ділянок де не проводилась сидерація.

Технологія біоіндикації ґрунту за рахунок використання крес-салату відповідала стандартній схемі пророщування і обробки отриманих результатів та деталізована в [2, 28]. Власне для біоіндикації фітотоксичного ефекту ґрунту було використано одночасно два параметри – схожість насіння (у % на 7-му добу після висіву (за стандартною методикою біотестування)), маса сформованої рослини (у мг на 10 добу пророщування).

Мікробіологічний аналіз ґрунту, відповідно до стандартних протоколів лабораторних випробувань, було проведено з відбором проб у 2014 на початку дослідів як варіант контролю, у 2019 році як проміжний етап індикації та у 2024 році як на варіанті без сидерації так і на варіанті систематичного застосування сидеральної маси редьки олійної з послідовним їх аналізом на базі сертифікованих та акредитованих лабораторій у 2014 та 2019 році – за сприяння Вінницької філії державної установи «Інститут охорони ґрунтів» (м. Вінниця), у 2024 році – у центрі лабораторних досліджень і розробок «МікроБіо Лаба» (м. Теплодар, Одеської області). В ході лабораторних аналізів було визначено такі параметри:

– визначення швидкості мікробного дихання ґрунту (у структурі визначення: базальне дихання, $\text{мгCO}_2/\text{кг ґрунту/год}$, субстрат-індуковане дихання, $\text{мгCO}_2/\text{кг ґрунту/год}$, коефіцієнт мікробного дихання відповідно до протоколу нормативного методу випробувань М.ЦЛДР 7.2-02-14) [12, 20];

Таблиця 2

**Шкала оцінювання рівня пригнічення
ростових процесів рослин
за оцінки фітотоксичності ґрунту [2]**

ФЕ, %	Рівень фітотоксичності
0–20	Слабкий
20–40	Середній
40–60	Вище середнього
60–80	Високий
80–100	Дуже високий (максимальний)

– мікробна біомаса ґрунту, г/кг ґрунту (протокол нормативного методу випробувань М.ЦЛДР 7.2-02-14) [7, 12, 20];

– визначення еколого-функціональних груп ґрунтових мікроорганізмів (протокол нормативного методу випробувань М.ЦЛДР 7.2-02-13) [12, 20].

Аналіз гідротермічних умов періоду проведення досліджень було проведено за показниками: середньодобова температура ($^{\circ}\text{C}$), кількість опадів (мм), відносна вологість (%), гідротермічний коефіцієнт (ГТК) (формула 2) та коефіцієнтом значущості відхилень (C_{sd}) (формула 3) (табл. 3).

$$HTC = \frac{\sum R}{0.1 \times \sum t_{>10}} \quad (2)$$

де $\sum R$ – сума опадів за період з температурою вище 10°C , $\sum t_{>10}$ – сума ефективних температур за період досліджень. Рейтинг умов за значенням HTC: HTC > 1,6 – надмірна вологість, HTC 1,3–1,6 – вологі, HTC 1,0–1,3 – помірно сухі, HTC 0,7–1,0 – сухі, HTC 0,4–0,7 – дуже сухі.

$$C_{sd} = \frac{(X_i - X_{av})}{S} \quad (3)$$

де: X_i – поточний елемент погоди; X_{av} – показник середнього багаторічного значення; S – середнє квадратичне відхилення; i – порядковий номер року. Рівень C_{sd} : $0 \div 0.5$ (-0.5) – умови близькі до нормальних; (-1) $1 \div (-2)$ 2 – суттєво відрізняються від багаторічних; > 2 (< -2) – близькі до екстремальних.

Статистична обробка результатів досліджень проводилась у середовищі програм Exel та Statistica 10 (StatSoft – Dell Software Company, США) з розрахунком показників: середнього арифметичного, стандартне відхилення, коефіцієнту варіації, кореляційних відношень Для порівняння різниць між варіантами було використано дисперсійний аналіз та тест Бонферроні для статистичного рівня $p < 0,05$ та $p < 0,01$ [48].

Основні результати дослідження. Оцінка сидеральної продуктивності редьки олійної за виходом листостеблової та кореневої маси підтвердила як належність культури до високопродуктивної групи за проміжного сидерального використання, так і відносну її чутливість до гідротермічних умов періоду формування сидеральної маси. Середньобагаторічний показник сформованої загальної сидеральної маси (листочково-стеблова маса + корені) був на рівні 24,01 т/га (4,02 т/га у сухій речовині) за показника міжрічного співставного варіювання (у виразі коефіцієнту варіації) 31,55% та 28,53% відповідно (рис. 1).

При цьому коефіцієнт продуктивності кореневої системи як співвідношення надземної маси та маси коренів мав значення 3,52 для виразу у сирій масі та 2,34 для виразу у сухій речовині. Беручи до уваги гідротермічні умови періоду досліджень на підставі проведеного кореляційного аналізу рівень сидеральної продуктивності редьки олійної мав тісну з прямим характером залежність від кількості опадів як для надземної, так і кореневої біомаси ($r=0,633$ та $r=0,609$ відповідно при $p < 0,01$)

Оцінка гідротермічних умов за період досліджень (за показником ГТК), 2014–2025 рр.

Рік	Сума опадів, мм (IV-X)	*t _{aver} , °C (IV-X)	Місяці періоду вегетації										Csd aver V–IX	*t _{aver} , °C	**Сума опадів, мм
			V		VI		VII		VIII		IX				
			Xi	Csd	Xi	Csd	Xi	Csd	Xi	Csd	Xi	Csd			
2014	590,4	14,62	3,93	3,39	1,55	1,00	1,31	0,24	1,05	0,46	1,25	1,10	1,24	0,2	245,5
2015	303,1	15,48	0,92	0,19	0,72	-0,53	0,32	-1,16	0,12	-1,13	1,184	0,97	-0,33	9,5	256,1
2016	406,1	15,33	0,49	-0,26	1,27	0,48	1,06	0,39	0,90	0,46	0,01	-1,17	-0,02	-0,6	325,7
2017	443,1	15,04	0,78	0,04	0,50	-0,92	1,52	1,38	0,82	0,30	3,10	4,47	1,05	-0,4	323,7
2018	444,2	16,39	0,31	-0,45	4,40	6,28	2,16	2,71	0,59	-0,19	1,38	1,33	1,94	0,0	271,0
2019	560,2	15,70	4,90	4,42	1,68	1,25	1,01	0,30	0,24	-0,90	0,99	0,62	1,14	2,9	200,5
2020	589,2	15,64	5,33	4,87	1,55	1,01	0,59	-0,59	0,53	-0,30	0,86	0,38	1,07	-0,3	356,1
2021	459,7	14,33	3,13	2,54	1,68	1,25	0,78	-0,19	1,46	1,61	0,71	0,10	1,06	1,2	216,9
2022	678,7	15,15	1,43	0,74	1,50	0,91	0,90	0,06	1,71	2,13	4,96	7,86	2,34	2,2	278,0
2023	486,9	16,24	0,09	-0,69	1,64	1,18	1,41	1,14	0,65	-0,05	1,02	0,66	0,45	2,9	371,2
2024	481,9	17,94	0,58	-0,17	1,66	1,21	1,19	0,67	0,77	1,46	0,45	-0,38	0,41	1,2	263,8
2025														1,8	238,0

* – середня середньодобова температура (°C) за період листопад попереднього року – березень наступного; ** – сума опадів (мм) за період листопад попереднього року – березень наступного. Для умов 2025 року відповідно до порядку оцінки вказано тільки показники по березень до дати відбору ґрунтових проб для біоіндикації фітотоксичності ґрунту.

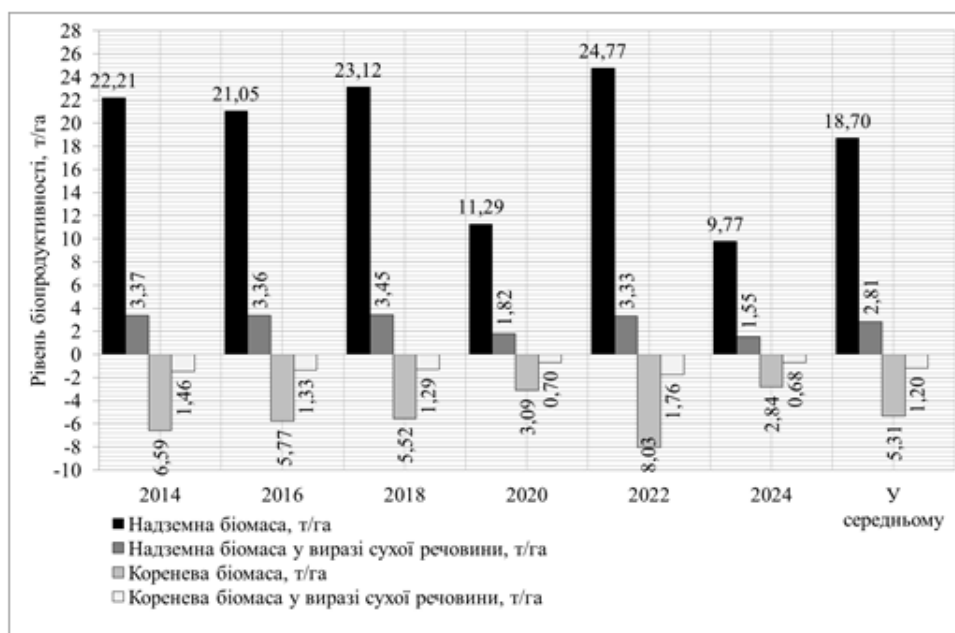


Рис. 1. Рівень загальної сидеральної біопроductивності редьки олійної у роки її літнього проміжного строку вирощування на фазу цвітіння (BBCH 64–67), т/га (НІР₀₅: 1,07 – для надземної біомаси; 0,29 – для надземної біомаси у виразі сухої речовини; 0,58 – для кореневої біомаси; 0,17 – для кореневої біомаси у виразі сухої речовини)

та середню з оберненим характером від значення середньодобової температури ($r=-0,507$ та $r=-0,588$ відповідно при $p<0,05$). Для показника ГТК залежність була тісного прямого характеру ($r=0,727$ та $r=0,772$ відповідно при $p<0,01$). Слід зауважити, що не дивлячись на те, що основним

лімітуючим чинником успішності сидерального використання редьки олійної у варіанті літнього проміжного строку є комплексний рівень вологозабезпечення з огляду на аналіз подібних оцінок для ріпаку ярого та гірчиці білої – дана культура демонструє вищу адаптивну пристосованість

зокрема з огляду на високі темпи росту, відносну толерантність фотоперіодичної реакції та інтенсивність розвитку кореневої системи, що відмічено в дослідженнях її властивостей [58].

Такі визначені особливості на підставі зональну оцінку хрестоцвітих видів рослин як покривних сидеральних культур [36, 38] дозволяють віднести редьку олійну до перспективних сидератів у варіанті їх літніх строків сівби та осіннього сидерального використання.

Відмічається, що хрестоцвіті види за їх сидерального систематичного використання за рахунок наявності у сидеральній масі окремих специфічних біохімічних компонентів (зокрема глюкозинолатів, окремих лігнізованих структур з тривалим розкладом) здатні формувати ознаки фітотоксичності ґрунту у формі алелопатичної післядії [9, 33]. Такі особливості зумовлюють необхідність в оцінці фітотоксичності ґрунту за варіанту систематичного застосування сидеральної маси редьки олійної на одному і тому ж полі (у нашому досліді раз на два роки). При цьому слід зауважити, що ґрунти мають власний рівень фітотоксичності, який визначається рисами його сільськогосподарського використання з позиції застосованих добрив, засобів захисту, вираженості та направленості відповідних ґрунтових властивостей [35]. Наявність певного фітотоксичного ефекту за сидерального використання редьки олійної було підтверджено (рис. 2).

Результати дослідження засвідчили акумулятивний варіант впливу на схожість насіння. У перший період сидерації до 2019 року було відмічено позитивний прирістний вплив на показник лабораторної схожості насіння рослини індикатора крес

салату. У послідовному відмічена поступова ідентифікація депресуючого впливу із зниженням схожості насіння у варіанті із сидерацією проти контролю. При цьому відмічена загальна тенденція до зміщення вказаного ефекту з шару ґрунту 0–10 см на шар ґрунту 20–30 см, що пов'язано з визначеними процесами перерозподілу біохімічних компонентів сидеральної маси у процесі її розкладу у товщі ґрунтового профілю від рівня глибини загортання, що поступово веде до вирівнювання градієнту концентрації та за відповідних темпів ґрунтової міграції сприяє переміщенню основних компонентів у горизонти глибші за акумуляцію сидеральної маси у ґрунтовому профілі (що відмічено у [21]). Аналогічний перерозподіл ідентифікований і для варіанту оцінки фітотоксичного ефекту за показником маси сформованої рослини.

На відміну від критерію схожості оптимізація ґрунтових умов живлення за рахунок сидеральної маси формує передумови результуючого домінування позитивного ефекту впливу на ростові процеси, який поступово зміщується на горизонти 10–20 та 20–30 см з роками. При цьому виявлений супресуючий вплив біохімічних похідних алелопатичного характеру, вивільнених у результаті розкладення сидеральної маси у ґрунті, які властиві редьці олійній з позиції впливу на однорічні культури різних видів [59] починає поступово зростати, знижуючи позитивний ефект від сидерації з визначеного позитивного впливу власне на основні параметри ґрунтової родючості, досягаючи середнього рівня градації (табл. 2). У результативному підсумку на періоди 2022/2024 років сидерації загальний позитивний показник приросту маси рослин

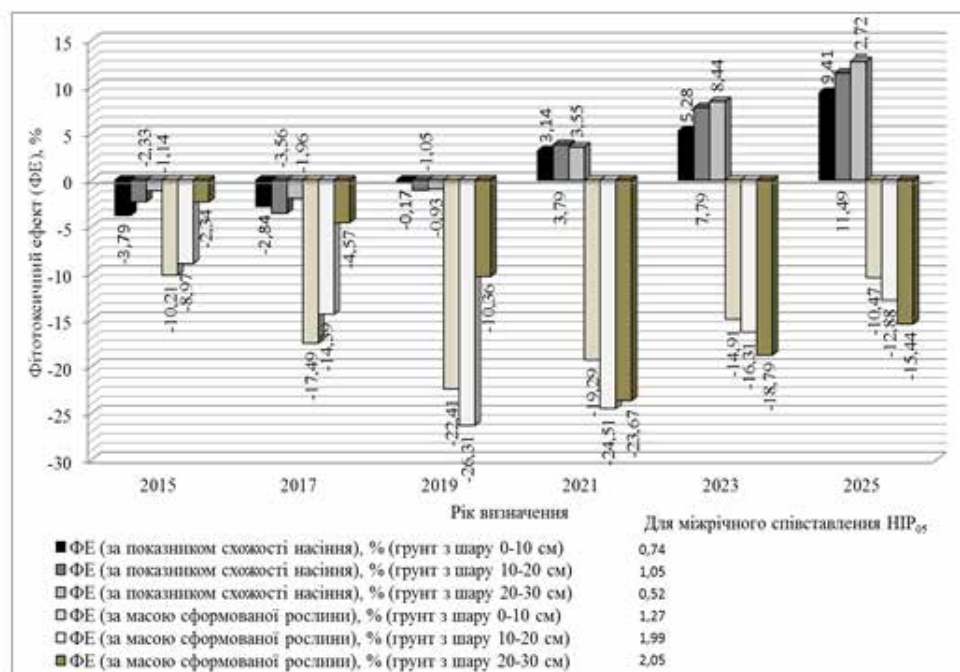


Рис. 2. Результати оцінки фітотоксичності ґрунту за показником фітотоксичного ефекту (ФЕ) у співставленні варіантів контролю (без сидерації) та дослідного (за сидерації редькою олійною) на наступний рік після її проведення (за період 2015–2025 рр.), %

(за негативного ФЕ) поступово знижується на 8,37–9,56% від максимального досягнутого значення на 2019 рік. На підставі такої динаміки показників, систематичне застосування редьки олійної як сидерату формує ймовірний виражений фітотоксичний ефект з позиції впливу на схожість наступних культур, що узгоджується з алелопатичним потенціалом редьки олійної на підставі полівидової ідентифікації [6, 58]. З позиції забезпечення ростових процесів рослин у ланках сидерального використання редьки олійної, фітотоксичний ефект впливу на ґрунт також присутній, але він більш пролонгований у часі, хоча і демонструє інтенсивне зростання вже після 4 періодів систематичної сидерації. Ймовірність його інтенсивного зростання очевидно буде істотно вищою за щорічного застосування редьки олійної як сидерату у сівозміні на одній і тій же площі поля. При цьому слід зауважити на підставі висновків [4, 21], що ймовірність фітотоксичності сидерального використання редьки олійної буде більш вираженою на ґрунтах із низькими значеннями потенціалу ґрунтової родючості.

Отримані результати особливостей фітотоксичності сидерації за використання редьки олійної на основі біоіндикації ґрунту було підтверджено її значенням вираженим у вже згадуваних умовних кумаринових одиницях (УКО) (рис. 3). Встановлено, що за систематичного використання сидерації редьки олійної фітотоксичність ґрунту зростала як у контрольному варіанті без сидерації, так і у варіанті з її застосуванням, хоча темпи зростання істотно відрізнялися. У середньому для шару ґрунту 0–30 см приріст фітотоксичності протягом періоду співставлення контрольних дат становив 0,116 УКО (кондиційні кумаринові одиниці)/рік у контрольному варіанті, тоді як за систематичної сидерації – 0,281 УКО/рік.

Динаміку зростання фітотоксичності у контрольному варіанті можна пояснити висновками [49] щодо загального зниження темпів іммобілізації рослинних решток на тлі ідентифікованої деградації ґрунту, накопичення рослинних решток із низькою швидкістю розкладання та створення передумов для загального зростання фітотоксичності ґрунту.

Згідно з [8], рівень фітотоксичності вище 20 УКО є критичним у плані суттєвого впливу не лише на схожість наступних культур, але й на загальні процеси росту на ранніх етапах їх вегетації. Виходячи з цього, застосований режим сидерації (раз на два роки), із досяжним середнім рівнем 11,17 ККО у шарі ґрунту 0–30 см, забезпечує агрономічно прийнятні темпи зростання фітотоксичності ґрунту при збереженні позитивного впливу на його агрофізичні властивості, і тому може бути рекомендованим для сірих лісових ґрунтів.

Натомість щорічне систематичне застосування редьки олійної як сидерату на одній і тій самій ділянці, згідно з [8, 9], із достовірною ймовірністю може спричинити підвищення рівня фітотоксичності ґрунту, що перевищуватиме критичний поріг у 20 ККО. Знову ж таки, спираючись на окремі оцінки [55] для ґрунтів іншого типу та за альтернативної інтенсивності сидерації, це питання потребує подальшого вивчення.

Результати досліджень підтвердили висновки ряду досліджень [14, 21, 26, 29, 37] щодо впливу сидеральних систем удобрення на мікробіологічну активність ґрунту (табл. 4). За рахунок збагачення ґрунтового профілю (в основному 10–30 см) свіжою листостебловою масою та рештками кореневих систем з низьким співвідношенням C/N та відповідно багатою білками, жирами та карбогідратами – формуються умови

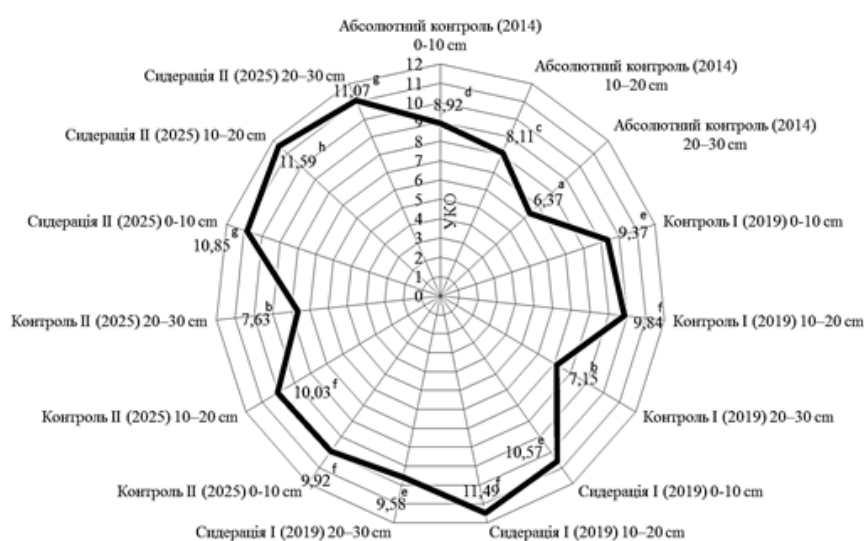


Рис. 3. Динаміка фітотоксичності ґрунту за різних варіантів сидерального удобрення в умовних кумаринових одиницях (УКО), 2014–2025 рр. Примітка: Різні малі літери вказують на достовірні відмінності між варіантами в межах одного шару ґрунту ($p < 0,05$)

для зростання педотрофів, целюлозолітиків, азот-фіксаторів [20]. Саме ці групи ґрунтових мікроорганізмів мають певні переваги щодо зростання чисельності.

Ці висновки позитивно узгоджуються з результатами періодичного моніторингу структури еколого-функціональних груп ґрунтових мікроорганізмів у співставленні рубіжних значень варіантів без сидерації і за її застосування на рубіжну дату обліку (2024 рік). Так зростання у варіанті за сидерального використання редьки олійної відмічено у значенні: педотрофи 35,17%, азотфіксатори 33,07% та целюлозолітики 39,38%. При цьому оптимізації колообігу органіки у ґрунті сформувала передумови для зниження чисельності оліготрофів [3, 4, 21] – для того ж варіанту співставлення їх частка у структурі зменшилась на 27,0% за одночасного їх зростання у контрольних варіантах на 17,27%.

Такі процеси є ідентифікаторами сталої тенденції погіршення живильного середовища мікроорганізмів, а отже і погіршення ґрунтових умов живлення для рослин за умови повної відсутності мінеральних добрив та використання єдиного резерву рослинних решток без застосування компенсуючого удобрення з огляду на високі значення співвідношення C/N властиве більшості рослинних решток основних сільськогосподарських культур [50, 53] та з урахуванням умов нестійкого зволоження, що формує передумови для повільного розкладання сухих рослинних решток та істотної переваги при цьому свіжої листостеблової та резервно-волої кореневої маси редьки олійної [55, 58]. Такий характер

мікробіологічних процесів у ґрунті у системі застосованих дослідних варіантів підтверджено позитивним ростом чисельності целюлозолітиків у співставленні контролю 2014 та контролю 2024 років – приріст для цієї групи мікроорганізмів був у значенні 28,95% для целюлозолітичних бактерій та 27,20% для целюлозолітичних мікроміцетів.

Закономірно за рахунок листостеблової маси редьки олійної багатої на фосфор, кальцій, сірку, білки (відповідно до тривалої біохімічної оцінки її сидеральної маси [20, 21, 61]) формуються позитивні передумови для зростання фосфатмобілізуючих мікроорганізмів (приріст на рубіжну дату обліку до контролю на цю ж дату 29,81%), амоніфікаторів (23,49%), амілолітичних бактерій (29,34%), нітрифікаторів (37,33%). Такий характер дії позитивно впливає на азотний режим ґрунту та ступінь доступності азоту для рослин у сівозміні та сприяє формуванню стійкої біологічної рівноваги у ґрунті, що позитивно узгоджується із рядом досліджень [19, 39, 42]. Разом із тим, темпи приростів у досліді були нижчими, ніж у варіантах поєднання сидерації з проміжними варіантами мінерального удобрення у поєднання з ґрунтовими меліорантами [30], що вказує на часткове закріплення продуктів розкладу сидератів та позитивних змін в акумуляції відповідних компонентів розкладу. Такий характер з одного боку сприятиме стабілізації ґрунтових процесів, які визначають рівень ґрунтової родючості, а з іншого – буде мати середні темпи ґрунтовідновлення за умови відповідного чергування культур з умовою рівноважної

Таблиця 4

Показники мікробіологічної якості та мікробіологічної активності ґрунту залежно від варіантів досліду (у рубіжні дати обліку 2014, 2019 та 2024 роки)*

Показники	2014	2019		2024	
		Контроль	Сидерація	Контроль	Сидерація
Базальне мікробне дихання ґрунту, мгСО ₂ /кг ґрунту/год	4,77a	5,09b	5,35c	5,36c	5,68d
Субстрат-індуковане дихання ґрунту, мгСО ₂ /кг ґрунту/год	31,72c	30,72b	33,87d	28,14a	38,91e
Коефіцієнт мікробного дихання ґрунту	0,16b	0,19c	0,16b	0,24d	0,14a
Мікробна біомаса ґрунту, г/кг	30,41c	26,88b	34,22d	22,64a	40,74e
Еколого-функціональні групи ґрунтових мікроорганізмів, КУО/г сухого ґрунту					
Олігонітрофільні та азотфіксувальні бактерії	a2,42x10 ⁷	a2,31x10 ⁷	c3,05x10 ⁷	b2,57x10 ⁷	d3,42x10 ⁷
Фосфатмобілізувальні бактерії	b3,36x10 ⁶	a3,21x10 ⁶	c3,79x10 ⁶	a3,12x10 ⁶	d4,05x10 ⁶
Стрептоміцети	a4,83x10 ⁶	a4,91x10 ⁶	c5,24x10 ⁶	b5,08x10 ⁶	d6,02x10 ⁶
Педотрофи	a4,12x10 ⁷	a4,03x10 ⁷	c5,22x10 ⁷	b4,35x10 ⁷	c5,88x10 ⁷
Амоніфікатори	b2,68x10 ⁷	a2,41x10 ⁷	c3,29x10 ⁷	b2,81x10 ⁷	d3,47x10 ⁷
Амілолітичні бактерії	c4,46x10 ⁷	b4,21x10 ⁷	d4,89x10 ⁷	a3,92x10 ⁷	e5,07x10 ⁷
Оліготрофи	b1,39x10 ⁷	b1,49x10 ⁷	a1,28x10 ⁸	c1,63x10 ⁸	a1,19x10 ⁷
Мікроміцети	a2,64x10 ⁵	a2,69x10 ⁵	b2,86x10 ⁵	b2,81x10 ⁵	c3,03x10 ⁵
Целюлозолітичні бактерії	a1,14x10 ⁴	a1,19x10 ⁴	c1,59x10 ⁴	b1,47x10 ⁴	d2,11x10 ⁴
Целюлозолітичні мікроміцети	a1,25x10 ⁴	a1,31x10 ⁴	b1,62x10 ⁴	b1,59x10 ⁴	c2,15x10 ⁴
Нітрифікатори	a6,72x10 ⁵	b7,13x10 ⁵	c8,06x10 ⁵	a6,59x10 ⁵	d9,05x10 ⁵

*Різні малі літери в таблиці вказують на значущі відмінності між варіантами досліду в одному і тому ж шарі ґрунту ($p < 0,05$).

концентрації у структурі культур зернобобової та технічної груп. З цих причин, для запобігання зростання фітотоксичності ґрунту за використання редьки олійної як сидерату (аспекти та інтервал якої описаний вище) – доцільним буде формування сівозмін сидерального утримання зі щорічним сидеральним застосунком з чергуванням злаково-бобових та хрестоцвітих видів сидератів, що зокрема відмічено і в інших дослідженнях [4, 10, 27]. Слід також відмітити, що за сидерального використання редьки олійної відмічено домінування у структурі мікробіоти ґрунту азото- та білковотрансформуючого характеру нітрифікаторів, що у підсумку зумовлює процеси, які певною мірою сприяють інтенсивним темпам колообігу азоту в ґрунті, що слід враховувати при вирощуванні після редьки культур з вираженими азотозо-фільними особливостями.

Така ж тенденція визначена і для вже згаданих целюлозолітиків знову ж таки за біохімічно різноманітного вмісту целюлозопохідних та лігнінопохідних структур у складі як листостеблової, так і кореневої сидеральної маси редьки олійної [58].

При цьому за рахунок високого вмісту глюкозинолатів у всіх частинах редьки олійної та формування за рахунок цього доведеного попередніми нашими дослідженнями біофумігаційного сидераційного ефекту – слід очікувати з високим достовірним ступенем ймовірності фітопатогенної біоти в ґрунті.

Відмічено [20, 21], що чисельність мікроміцетів у варіантах із сидерацією дещо зростає на початкових етапах після загортання зеленої маси, адже з'являється додаткове джерело органічного субстрату (целюлоза, лігнін, продукти розкладу). Водночас визначено, що у тривалій перспективі надмірного росту не відбувається, оскільки підвищується конкуренція з боку бактеріальних угруповань (особливо педотрофів і актиноміцетів). Тобто з цих міркувань трендовий характер за використання сидерації має забезпечувати помірне стабільне зростання у співставленні до контролю, що узгоджується із визначеними результатами приросту 7,83%. Щодо чисельності стрептоміцетів (актинобактерій) то з огляду на те, що вони є активними деструкторами складної органіки та продукують антибіотичні сполуки, стримуючи надмірний розвиток патогенних грибів (фузаріоз, ризоктонія тощо) їх динаміка була більш прирістною порівняно з мікроміцентами і у співставленні до контролю становила 17,26%. Спираючись на позитивну прирістну динаміку у ряду фіксації для контрольних варіантів чисельності мікроміцетів та стрептоміцетів (на рівні 6,44% та 5,18%) слід враховувати певну депресуючу дію глюкозинолатів листостеблової маси редьки олійної на дану біологічну групу відмічену в оцінці хрестоцвітих видів сидератів [36].

Вказані висновки підтверджуються результатами обліку показника мікробної біомаси ґрунту яка у співставленні до контролю без сидерації на кінцеву дату обліку склала результуючий приріст 33,97%. При цьому відмічається, що сталого формування позитивної динаміки росту мікробної

маси ґрунту слід очікувати на 2–4 рік систематичної сидерації залежно від типу сидерату та ґрунтово-кліматичних умов території [32], а сама величина приросту мікробної маси ґрунту за сталого сидерального утримання ґрунту в інтервалі 15–40% [21]. Вказується також [20, 21, 39], що середній прирістний характер змін структури еколого-функціональних груп мікробіоти ґрунту знаходиться в статистичних межах варіювання у значенні від 8 до 25% від середнього значення показника мікробної біомаси ґрунту [40]. Такий результат підтверджено результатами нашого тривалого вивчення з позиції оптимізації ґрунтового середовища за рахунок сидеральної маси, що максимально імітує природні процеси колообігу елементів та їх акумуляції у природних біогеоценозах. Більше того істотність різниці у приростах на 2019 рік обліку та на 2024 рік за показником мікробної маси ґрунту – приріст до вихідного контролю становив 12,53% та 19,05% відповідно – вказує на наростаючий акумулятивний ефект оптимізації мікробіологічного комплексу ґрунту, що у результуючому виразі підтвердило позитивну тривалу дію від застосування редьки олійної як сидерального компоненту на сірих лісових ґрунтах.

Визначено також зниження коефіцієнту мікробного дихання ґрунту (синонім метаболічний коефіцієнт, qCO_2) – на рівні 11,12% у співставленні 2014 року та 2024 року у варіанті сидерації та на 41,11% у співставленні варіантів контролю та варіанту сидерації на 2024 рік. Відомо, що даний показник застосовують як індикатор екологічної ефективності мікробних угруповань. Встановлено, що без сидерації та внесення органічних добрив він має більше номінальне значення, оскільки мікробіота витрачає більше енергії на підтримку життєдіяльності, а не на приріст біомаси, що в свою чергу опосередковано вказує на стійкі ознаки деградації ґрунту (брак доступного органічного вуглецю, ущільнення ґрунту, втрата структурованості тощо) [25]. Саме такий характер формування даного показника встановлено і в наших дослідженнях.

Вказується [33] на те, що сидерація підвищує базальне мікробне дихання, що свідчить про зростання мікробної активності, посилений кругообіг елементів живлення та відновлення мікробної рівноваги ґрунту. При цьому в умовах деградації ґрунту та зниження вмісту компонентів живильної трансформації базальне дихання також зростає, що підтверджується зростанням показника і на контрольних варіантах на проміжну та заключну дату обліку. Такий характер зростання співпадає із отриманими результатами, де приріст величини базального мікробного дихання на кінцеву дату індикації (2024 рік) був у значенні 19,08%, а для контрольного варіанту на цю ж дату 12,37%. Аналогічні особливості визначено і для субстрат-індукованого мікробного дихання де приріст до контролю був у значенні 22,67%. Враховуючи той факт, що субстрат-індуковане мікробне дихання є показником активної частини мікробної біомаси, яка швидко реагує на надходження

легкодоступного джерела вуглецю (зазвичай глюкози) [45] – регулярне внесення сидератів зменшує різкі коливання активності мікробів у часі, оскільки створюється постійний потік субстрату, що дозволяє віднести ґрунт із систематичним сидеральним внесенням до більш стабільного за показником «мікробною готовності» до розкладання органічної речовини. Навпаки на контролі без сидерації швидкість реакції трансформації внесених сидератів чи рослинних решток є послабленою в силу чого субстрат індуковане дихання знижується, формуючи різнонаправлену динаміку між формуванням базального та субстрат індукованого дихання. Такі результати підтверджено і в інших дослідженнях [46]. Загалом слід зауважити, що складна динаміка у формуванні показників інтенсивності дихання та акумуляції мікробної маси у співставленні контрольного та сидерального варіантів вказує на специфічні процеси трансформації сидеральної маси характерні для сірих лісових ґрунтів в силу їх помірного потенціалу родючості та відносно невисокому стартовому мікробіологічному потенціалу [21]. За рахунок цього ефективність застосування редьки олійної у тих же варіантах на ґрунтах з більш високим потенціалом родючості матиме прогнозовано істотно вищий агротехнологічний удобрювальний ефект.

Висновки. На підставі узагальнюючого аналізу ефективності використання редьки олійної у якості сидерального компоненту біоорганічних систем удобрення культур нехрестоцвітної групи у сівозміні доведено можливість її тривалого систематичного застосування з технологічною частотою раз на два роки з досяжним рівнем фітотоксичності за період 12 річного циклу вирощування сільськогосподарських культур за критерієм схожості у середньому для шару ґрунту 0–30 см на рівні 11,17 УКО. За критерієм формування маси рослин динаміка наростання фітотоксичності ґрунту за той же період агротехнологічного застосування сидерації становить 1,71% (ФЕ)/рік для шару ґрунту 0–10 см, 1,92% (ФЕ)/рік для шару ґрунту 10–20 см та 1,65% (ФЕ)/рік для шару ґрунту 20–30 см у співставленні до максимального значення в ряду динаміки показника на сірих лісових ґрунтах за умов нестійкого зволоження.

Доведено позитивний вплив систематичного варіанту застосування редьки олійної у варіанті проміжної сидерації з позиції впливу на мікробіологічний комплекс ґрунту з формуванням динамічного росту загальної мікробної маси ґрунту на рівні 1,03 г/кг ґрунту на рік у співставленні до вихідного рівня та 1,65 г/кг ґрунту на рік у співставленні кінцевих результатів контрольного та сидерального варіантів утримання ґрунту за період 2015–2025 рр. Визначено суттєве поліпшення структури еколого-функціональної групи ґрунтових мікроорганізмів за інтегрального коефіцієнту природи функціонально корисної ґрунтової мікробіоти у значенні 31,72% у співставленні до вихідного облікового значення на кінцеву дату обліку за період 2014–2024 рр.

Література

1. Балюк С. А., Кучер А. В., Ромащенко М. І. Ґрунтовий покрив України в умовах воєнних дій: стан, виклики, заходи з відновлення : монографія. Київ : Аграрна наука, 2024. 340 с.
2. Бессонова В. П. Фітоіндикація та фітомоніторинг : навчальний посібник. Дніпровський державний аграрно-економічний університет. Дніпро : Герда 2024. 206 с.
3. Волкогон В. В., Надкернична О. В., Токмакова Л. М. Експериментальна ґрунтова мікробіологія : монографія. Київ : Аграрна наука, 2010. 464 с.
4. Гамкало З. Біотична активність як критерій едафічного комфорту. Екологічна якість ґрунту. Львів : Видавничий центр Львівського національного університету імені Івана Франка, 2018. С. 200–254.
5. Головка Е.А., Шроль Т.С. Скринінг ґрунтових мікроорганізмів-активаторів біологічно активних речовин. *Мікробіологічний журнал*. 1994. Вип. 56. № 4. С. 55–59.
6. Господаренко Г. М., Лисянський О. Л. Алелопатичний вплив сидеральних культур на пшеницю озиму. *Вісник ЖНАЕУ*. 2015. № 2 (50), Т. 1. С. 190–198.
7. Грицаєнко Г. М. Методи біологічних та агрохімічних досліджень рослин і ґрунтів. Київ, 2003. 320 с.
8. Гродзинський А. М. Основи хімічної взаємодії рослин : монографія / відп. ред. І. Г. Вивалько. Київ : Наук. думка, 1973. 205 с.
9. Гродзинський А. М., Богдан Г. П., Головка Е. А. Алелопатична ґрунтовода. Київ : Наукова думка, 1979. 278 с.
10. Гродзинський А. М. Алелопатія рослин та ґрунтовода / вступ. ст. Е. А. Головка, В. В. Кваші. Київ : Наукова думка, 1991. 432 с.
11. Гродзинський Д. М., Шиліна Ю. В., Куцонь Н. К. Застосування рослинних тест-систем для оцінки комбінованої дії факторів різної природи: Методичні рекомендації по оцінці допустимих рівнів радіонуклідного та хімічного забруднення за їх комбінованої дії. К. : Фітосоціоцентр, 2006. 60 с.
12. Гудзь С. П., Гнатуш С. О., Яворська Г. В., Білінська І. С., Борсукевич Б. М. Практикум з мікробіології. Львів : Вид. центр ЛНУ імені Івана Франка, 2014. 436 с.
13. Гудзь В. П., Міщенко Ю. Г., Прасол В. І. Вплив післяживних сидератів на біологічну активність чорнозему типового малогумусного. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України*. 2009. Вип. 140. С. 84–89.
14. Дем'янюк О. С., Симочко Л. Ю., Тертична О. В. Сучасні методичні підходи до оцінювання екологічного стану ґрунту за активністю мікробіоценозу. *Питання біоіндикації та екології*. 2017. Вип. 22. № 1. С. 55–68.
15. 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.
16. ДСТУ 4287:2004 Якість ґрунту. Відбирання проб [Чинний від 2005-07-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2005. 9 с.

17. ДСТУ ISO 11269-1:2004. Якість ґрунту. Визначення дії забрудників на флору ґрунту. Частина 1. Метод визначення інгібіторної дії на ріст коренів (ISO 11269- 1995, IDT). [Чинний від 2005-07-01]. Вид. офіц. Харків : Інститут ґрунтознавства та агрохімії ім. О.Н. Соколовського Української Академії аграрних наук, 2005. 184 с.
18. ДСТУ ISO 11269-2: 2002. Якість ґрунту. Визначення дії забрудників на флору ґрунту. Частина 2. Вплив хімічних речовин на проростання та ріст вищих рослин (ISO 11269-1995, IDT). [Чинний від 2004-05-01]. Вид. офіц. Київ. Держстандарт України. 2004. 22 с.
19. Ермантраут Е. Р., Міщенко Ю. Г. Післязливні сидерати і мікробіологічна активність ґрунту. *Збірник наукових праць Подільського державного аграрно-технічного університету*. 2007. Вип. 15. С. 16–19.
20. Іутинська Г. О. Ґрунтова мікробіологія : навч. посіб. Київ : Арістей, 2006. 284 с.
21. Малиновська І. М., Ткаченко М. А. Мікробіологічні процеси у сірому лісовому ґрунті: монографія. Київ : «Аграрна наука», 2023. 120 с.
22. Міщенко Ю. Г. Післязливні сидерати та контроль забур'яненості. *Вісник СНАУ. Серія : Агрономія та біологія*. 2017. Вип. 9. С. 23–31.
23. Міщенко Ю. Г., Прасол В. І., Мозгова Н. М. Дія пожнивних посівів сидератів на агрофізичні властивості ґрунту. *Вісник СНАУ. Серія : Агрономія та біологія*. 2003. Вип. 7. С. 66–69.
24. Ольхович О. П., Мусієнко М. М. Фітоіндикація та фітомоніторинг: Метод. рек. / Київський національний ун-т ім. Тараса Шевченка. Київ, 2005. 64 с.
25. Пліско І. В. Якість орних ґрунтів України. Харків : ФОП Бровін О.В., 2020. 372 с
26. Пліско І. В., Моргун Д. О., Романчук К. Ю. До питання про використання мікробіологічних показників в оцінці якості ґрунту. *Агрохімія і ґрунтознавство*. 2022. Вип. 93. С. 12–23.
27. Пузік В. К. Алелопатично активні з'єднання і їх роль в агрофітоценозах. Харків : Харк. нац. аграр. ун-т ім. В. В. Докучаєва, 2002. 184 с.
28. Симочко Л. Ю., Дем'янюк О. С., Симочко В. В. Біоіндикація і біотестування ґрунтів – сучасні методичні підходи. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Сер. : Біологія*. 2017. Вип. 42. С. 77–81.
29. Симочко Л. Ю., Симочко В. В. Інтегрованість мікробного ценозу ґрунту при антропогенному навантаженні. *Наукові записки державного природознавчого музею*. 2007. Вип. 23. С. 111–118.
30. Сквіва Л. М., Гудзь С. О. Динаміка фітотоксичності ґрунту за різних систем удобрення. *Наукові доповіді НУБіП України*. 2021. Вип. 89. № 1. URL: <https://scireports.com.ua/uk/article/download/dinamika-fitotoksichnosti-gruntu-za-riznikh-sistem-udobrennya> (дата звернення 12.09.2025).
31. Харченко О. В., Міщенко Ю. Г., Прасол В. І., Сенченко Н. К. Основні концептуальні підходи щодо збереження родючості ґрунту при біологізації землеробства в Сумській області. *Вісник СНАУ. Серія : Агрономія і біологія*. 2013. Вип. 11. С. 87–91.
32. Цицюра Я. Г., Неїлик М. М., Дідур І. М., Поліщук М. І. Сидерація як базова складова біологізації сучасних систем землеробства. Вінниця : ТОВ «Друк», 2022. 770 с.
33. Цицюра Я. Г., Шкатула Ю. М., Забарна Т. А., Пелех Л. В. Інноваційні підходи до фіторе mediaції та фіторекультивзації у сучасних системах землеробства. Монографія. Вінниця : ТОВ «Друк». 2022. 1200 с.
34. Шерстобоева О. В., Дем'янюк О. С., Чабанюк Я. В. Біодіагностика і біобезпека ґрунтів агро-екосистем. *Агроекологічний журнал*. 2017. № 2. С. 142–149.
35. Юрчак Л. Д. Алелопатія в агробіогеоценозах ароматичних рослин : монографія / відп. ред. П. А. Мороз ; рец. В. Г. Собко, Е. А. Головки. Київ : Фітосоціоцентр, 2005. 411 с.
36. Bhogal A., White C., Morris N. Maxi Cover Crop: Maximising the benefits from cover crops through species selection and crop management. Project Report №. 620. AHDB Cereals & Oilseeds. 2020. 111 p.
37. Chen S., X. Zhang L. Shao H., Sun J., Liu X. Effects of straw and manure management on soil and crop performance in North China plain. *Catena*. 2020. Vol. 187. 104359.
38. Clark A. Managing cover crops profitably. DIANE Publishing (3rd ed.). 2008. 248 p.
39. Demyanyuk O.S., Patyka V.P., Sherstoboeva O.V., Bunas A. A. Formation of the structure of microbiocenoses of soils agroecosystems depending on trophic and hydro-thermic factors. *Biosystems diversity*. 2018. Vol. 26. № 2. P. 103–110.
40. De Willigen P., Janssen B. H., Heesmans H. I. M., Conijn J. G., Velthof G. J., Chardon W. J. Decomposition and accumulation of organic matter in soil. Comparison of some models. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1726. 2008. 74 p.
41. Fanish S.A. Impact of Green Manure Incorporation on Soil Properties and Crop Growth Environment: A Review. *World Journal of Agricultural Sciences*. 2017. Vol. 13. № 3. P. 122–132.
42. Glibovytska N., Mykhailiuk Yu. Phytoindication research in the system of environmental monitoring. *Екологічні науки*. 2020. № 1 (28). С. 111–114.
43. Israt I.J., Parimal B.K. Residual Effect of Green Manure on Soil Properties in Green Manure-Transplant Aman-Mustard Cropping Pattern. *Indian Journal of Agricultural Research*. 2023. Vol. 57. № 1. P. 67–72.
44. Khamare Y, Chen J., Marble S.C. Allelopathy and its application as a weed management tool: A review. *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. 1034649.
45. Lei B., Wang J., Yao H. Ecological and environmental benefits of planting green manure in paddy fields. *Agriculture*. 2022. Vol. 12. №2. 223.
46. Lin Y., Ye G., Kuzyakov Y., Liu D., Fan J., Ding W. Long-term manure application increases soil organic matter and aggregation, and alters microbial community structure and keystone taxa. *Soil Biology and Biochemistry*. 2019. Vol. 134. P. 187–196.
47. Ma D., Yin L., Ju W., Li X., Liu X., Deng X., Wang S. Meta-analysis of green manure effects on soil properties and crop yield in northern China. *Field Crop Research*. 2020. Vol. 266. 108146.
48. Nisbet R., Elder J., Miner G. Handbook of Statistical Analysis and Data Mining Applications. Academic Press, Inc., USA. 2009. 860 p.
49. Ohno T., Doolan K., Zibilske L.M., Liebman M., Gallandt E.R. Berube C. Phytotoxic effects of red clover amended soils on wild mustard seedling

growth. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2000. Vol. 78. P. 187–192.

50. Pan D., Tang J., Zhang L., He M., Kung C. The impact of farm scale and technology characteristics on the adoption of sustainable manure management technologies: Evidence from hog production in China. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 280. 124340.

51. Pedrol N., Puig C. G. Application of Allelopathy in Sustainable Agriculture. *Agronomy*. 2024. Vol. 14. № 7. 1362.

52. Qadir M., Schubert S., Steffens D. Phytotoxic Substances in Soils. *Encyclopedia of Soils in the Environment*. 2013. P. 216–222.

53. Silva G. T. A., Matos L. V., Nóbrega P. de O., Carneiro E. F., Resende A. S. de Resende. Chemical composition and decomposition rate of plants used as green manure. *Scientia Agricola*. 2008. Vol. 65. № 3. P. 298–305.

54. Test Guidelines for the conduct of tests for distinctness, uniformity and stability of Fodder Radish (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.). 2017. TG/178/3, UPOV, Geneva. 19 p.

55. Tiquia S.M., Tam N.F.Y., Hodgkiss I.J. Effects of composting on phytotoxicity of spent pig-manure sawdust litter. *Environmental Pollution*, 1996. Vol. 93. № 3. P. 249–256.

56. Toungos M. D., Bulus Z. W. Cover crops dual roles: Green manure and maintenance of soil fertility, a review. *International Journal of Innovative Agriculture and Biology Research*. 2019. Vol. 7. № 1. P. 47–59.

57. Tsytisura 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.

58. Tsytisura Y. Potential of oilseed radish (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.) as a multi-service cover crop (MSCC). *Agronomy Research*. 2024. Vol. 22. № 2. P. 1026–1070.

59. Tsytisura Y., Sampietro D. Allelopathic Effects of Annual Weeds on Germination and Seedling Growth of Oilseed Radish (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.). *Acta Fytotechnica et Zootechnica*. 2024. Vol. 27. № 1. P. 77–97.

60. Undersander D., Mertens D.R., Thies N. Forage analyses. Procedures. National Forage Testing Association. 1993. 139 p.

61. Zhang J., Li, P. Using soil microorganism to construct a new index of soil quality evaluation. *Earth Environment Science*. 2020. Vol. 440. №052023. P. 1–4.

References

1. Baliuk, S. A., Kucher, A. V., Romashchenko, M. I. (2024). Gruntovyi pokryv Ukrainy v umovakh voiennykh dii: stan, vyklyky, zakhody z vidnovlennia [Soil Cover of Ukraine under Military Actions: State, Challenges, Restoration Measures]: monohrafiia. Kyiv : Ahrarna nauka [in Ukrainian].

2. Bessonova, V.P. (2024). Fitoindykatsiia ta fitomonitoring [Phytoindication and Phytomonitoring]. Navchalnyi posibnyk. Dniprovskiy derzhavnyi ahrarno-ekonomichnyi universytet. Dnipro: Herda [in Ukrainian].

3. Volkohon, V. V., Nadkernychna, O. V., Tokmakova, L. M. (2010). Eksperymentalna gruntova

mikrobiolohiia [Experimental Soil Microbiology]: monohrafiia. Kyiv : Ahrarna nauka [in Ukrainian].

4. Hamkalo Z. (2018). Biotychna aktyvnist yak kryterii edafichnoho komfortu. Ekolohichna yakist gruntu [Biotic Activity as a Criterion of Edaphic Comfort. Ecological Quality of Soil]. Lviv : Vydavnychiy tsentr Lvivskoho natsionalnoho universytetu imeni Ivana Franka [in Ukrainian].

5. Holovko, E. A., Shrol, T. S. (1994). Skryninh gruntovykh mikroorhanizmiv- aktyvatoriv biolohichno aktyvnykh rehovyn [Screening of soil microorganisms – activators of biologically active compounds]. *Mikrobiolohichnyi zhurnal*. 1994. Vyp. 56. № 4. C. 55–59. [in Ukrainian].

6. Hospodarenko, H. M., Lysianskyi, O. L. (2015). Aleopatychnyi vplyv syderalnykh kultur na pshenytsiu ozymu [Allelopathic Influence of Green Manure Crops on Winter Wheat]. *Visnyk ZhNAEU*. 2015. № 2 (50), T. 1. S. 190–198 [in Ukrainian].

7. Hrytsaienko, H.M. (2003) Metody biolohichnykh ta ahrokhimichnykh doslidzhen roslyn i gruntiv [Methods of Biological and Agrochemical Research of Plants and Soils]. Kyiv [in Ukrainian].

8. Hrodzynskyi, A. M. (1973). Osnovy khimichnoi vzaiemodii Roslyn [Fundamentals of Chemical Interactions of Plants] : monohrafiia / vidp. red. I. H. Vyvalko. Kyiv : Nauk. dumka [in Ukrainian].

9. Hrodzynskyi, A. M., Bohdan, H. P., Holovko, E. A. (1979). Aleopatychna gruntovtoma [Allelopathic Soil Fatigue]. Kyiv : Naukova dumka [in Ukrainian].

10. Hrodzynskyi, A. M. Aleopatiia roslyn ta gruntovtoma [Plant Allelopathy and Soil Fatigue] / vstup. st. E. A. Holovka, V. V. Kvashi. Kyiv : Naukova dumka [in Ukrainian].

11. Hrodzynskyi, D. M., Shylyna, Yu. V., Kutson, N. K. (2006). Zastosuvannia roslynnykh test-system dlia otsinky kombinovanoi dii faktoriv riznoi pryrody: Metodichni rekomendatsii po otsintsi dopustymykh rivniv radionuklidnoho ta khimichnoho zabrudnennia za yikh kombinovanoi dii [Application of Plant Test Systems for Assessing the Combined Effects of Factors of Different Nature: Methodological Recommendations for Assessing Permissible Levels of Radionuclide and Chemical Contamination under Their Combined Action]. K. : Fitosotsiotsentr [in Ukrainian].

12. Hudz, S. P., Hnatush, S. O., Yavorska, H. V., Bilinska, I. S., Borsukevych, B. M. (2014). Praktykum z mikrobiolohii [Practicum in Microbiology]. Lviv : Vyd. tsentr LNU imeni Ivana Franka [in Ukrainian].

13. Hudz, V. P., Mishchenko, Yu. H., Prasol, B. I. (2009). Vplyv pisliashnyvnykh syderativ na biolohichnu aktyvnist chornozemu typovoho malohumusnoho. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy [Influence of Post-Harvest Green Manures on the Biological Activity of Typical Low-Humus Chernozem]*. Vyp. 140. S. 84–89.

14. Demianiuk, O.S., Symochko, L.Iu., Tertychna, O.V. (2017). Suchasni metodichni pidkhody do otsiniuvannia ekolohichnoho stanu gruntu za aktyvnistiu mikrobiotsenozu. Pytannia bioindykatsii ta ekolohii [Modern Methodological Approaches to Assessing the Ecological State of Soil by Microbiocenosis Activity]. Vyp. 22. № 1. S. 55–68 [in Ukrainian].

15. DSTU ISO 10381-6-2001 (2002). Yakist gruntu. Vidbir prob. Ch.6. Nastanovy shchodo vidboru, obroblennia ta zberihannia gruntu dlia doslidzhenia aerobnykh mikrobiolohichnykh protsesiv u laboratorii [Soil Quality. Sampling. Part 6. Guidelines for Sampling, Handling and Storage of Soil for the Study of Aerobic Microbiological Processes in the Laboratory] (ISO 10381-6:1993, IDT). Kyiv, Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
16. DSTU 4287:2004 (2005). Yakist gruntu. Vidbyrannia prob [Soil Quality. Sampling] [Chynnyi vid 2005-07-01]. Kyiv : Derzhspozhyvstandart Ukrainy [in Ukrainian].
17. DSTU ISO 11269-1:2004. (2005). Yakist gruntu. Vyznachennia dii zabrudnykiv na floru gruntu. Chastyna 1. Metod vyznachennia inhibitornoi dii na rist koreniv [Soil Quality. Determination of Contaminant Effects on Soil Flora. Part 1. Method for Determining Inhibitory Effects on Root Growth] (ISO 11269- 1995, IDT). [Chynnyi vid 2005-07-01]. Vyd. ofits. Kharkiv : Instytut gruntoznavstva ta ahrokhimii im. O.N. Sokolovskoho Ukrainiskoi Akademii aharnykh nauk [in Ukrainian].
18. DSTU ISO 11269-2: 2002. (2004). Yakist gruntu. Vyznachennia dii zabrudnykiv na floru gruntu. Chastyna 2. Vplyv khimichnykh rehovyn na prostannia ta rist vyshchykh Roslyn [Soil Quality. Determination of Contaminant Effects on Soil Flora. Part 2. Influence of Chemicals on Germination and Growth of Higher Plants] (ISO 11269-1995, IDT). [Chynnyi vid 2004-05-01]. Vyd. ofits. Kyiv. Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
19. Ermantraut, E. R., Mishchenko, Yu. H. (2007). Pisliazhnyvni syderaty i mikrobiolohichna aktyvnist gruntu [Post-Harvest Green Manures and Soil Microbiological Activity]. *Zbirnyk naukovykh prats Podilskoho derzhavnoho aharno-tekhnicnoho universytetu*. Vyp. 15. S. 16–19 [in Ukrainian].
20. Iutynska, H. O. (2006). Gruntova mikrobiolohiia [Soil Microbiology]: navch. posib. Kyiv : Aristei [in Ukrainian].
21. Malynovska, I. M., Tkachenko, M. A. (2023). Mikrobiolohichni protsesy u siromu lisovomu grunti [Microbiological Processes in Grey Forest Soil]: monohrafiia. Kyiv : «Ahrarna nauka» [in Ukrainian].
22. Mishchenko Yu. H. (2017). Pisliazhnyvni syderaty ta kontrol zaburianenosti [Post-Harvest Green Manures and Weed Control]. *Visnyk SNAU. Serii: Ahronomiia ta biolohiia*. Vyp. 9. S. 23–31 [in Ukrainian].
23. Mishchenko, Yu. H., Prasol, V. I., Mozghova, N. M. (2003). Diia pozhnyvnykh posiviv syderativ na ahrofizychni vlastyvoli gruntu [Effect of Post-Harvest Green Manure Crops on Soil Agrophysical Properties]. *Visnyk SNAU. Serii : Ahronomiia ta biolohiia*. Vyp. 7. S. 66–69 [in Ukrainian].
24. Olkhovych, O.P., Musiienko, M.M. (2005). Fitoindykatsiia ta fitomonitorynh [Phytoindication and Phytomonitoring] : Metod. rek. / Kyivskiy natsionalnyi un-t im. Tarasa Shevchenka. Kyiv [in Ukrainian].
25. Plisko, I.V. (2020). Yakist ornykh gruntiv Ukrainy [Quality of Arable Soils of Ukraine]. Kharkiv : FOP Brovin O.V. [in Ukrainian].
26. Plisko, I. V., Morhun, D. O., Roman-chuk, K. Iu. (2022). Do pytannia pro vykorystannia mikrobiolohichnykh pokaznykiv v otsyntsi yakosti gruntu [On the Use of Microbiological Indicators in Soil Quality Assessment]. *Ahrokhimiia i gruntoznavstvo*. Vyp. 93. S. 12–23 [in Ukrainian].
27. Puzik, V. K. (2002). Alelopatychno aktyvni ziednannia i yikh rol v ahrofitotsenozakh [Allelopathically Active Compounds and Their Role in Agro-Phytocenoses]. Kharkiv : Khark. nats. ahrar. un-t im. V. V. Dokuchaieva [in Ukrainian].
28. Symochko, L. Iu., Demianiuk, O. S., Symochko, V.V. (2017). Bioindykatsiia i biotestuvannia gruntiv – suchasni metodychni pidkhody [Bioindication and Biotesting of Soils – Modern Methodological Approaches]. *Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho natsionalnoho universytetu. Ser. : Biolohiia*. Vyp. 42. S. 77–81 [in Ukrainian].
29. Symochko, L. Iu., Symochko, V. V. (2007). Intehrovanist mikrobnogo tsenozu gruntu pry antropohennomu navantazheni [Integration of Soil Microbial Cenosis under Anthropogenic Pressure]. *Naukovi zapysky derzhavnoho pryrodoznavchoho muzeiu*. Vyp. 23. S. 111–118 [in Ukrainian].
30. Skivka, L. M., Hudz, S. O. (2021). Dynamika fitotoksychnosti gruntu za riznykh system udobrennia [Dynamics of Soil Phytotoxicity under Different Fertilization Systems]. *Naukovi dopovidi NUBiP Ukrainy*. Vyp. 89. № 1. URL: <https://scireports.com.ua/uk/article/download/dynamika-fitotoksichnosti-gruntu-za-riznykh-sistem-udobrennya> (data zvernennia 12.09.2025) [in Ukrainian].
31. Kharchenko, O. V., Mishchenko, Yu. H., Prasol, V. I., Senchenko, N. K. (2013). Osnovni kontseptualni pidkhody shchodo zberezhenia rodiuchosti gruntu pry biolohizatsii zemlerobstva v Sumskii oblasti [Basic Conceptual Approaches to Preserving Soil Fertility in the Context of the Biologization of Agriculture in Sumy Region]. *Visnyk SNAU. Serii : Ahronomiia i biolohiia*. Vyp. 11. S. 87–91 [in Ukrainian].
32. Tsytisura, Ya. H., Neilyk, M. M., Didur, I. M., Polishchuk, M. I. (2022). Syderatsiia yak bazova skladova biolohizatsii suchasnykh system zemlerobstva [Green Manuring as a Basic Component of the Biologization of Modern Farming Systems]. Vinnytsia : TOV «Druk» [in Ukrainian].
33. Tsytisura, Ya. H., Shkatula, Yu. M., Zabarna, T. A., Pelekh, L. V. (2022). Innovatsiini pidkhody do fitoremediatsii ta fitorekultyvatsii u suchasnykh systemakh zemlerobstva [Innovative Approaches to Phytoremediation and Phytorecultivation in Modern Farming Systems]. Monohrafiia. Vinnytsia : TOV «Druk» [in Ukrainian].
34. Sherstoboieva, O. V., Demianiuk, O. S., Chabaniuk, Ya. V. (2017). Biodiagnostyka i biobezpeka gruntiv ahroekosystem [Biodiagnostics and Biosafety of Agroecosystem Soils]. *Ahroekolohichni zhurnal*. № 2. S. 142–149 [in Ukrainian].
35. Yurchak, L. D. (2005). Alelopatiia v ahrobioheotsenozakh aromatychnykh Roslyn [Allelopathy in Agro-Biogeocenoses of Aromatic Plants] : monohrafiia / vidp. red. P. A. Moroz; rets. V. H. Sobko, E. A. Holovko. Kyiv : Fitosotsiotsentr [in Ukrainian].
36. Bhogal, A., White, C., Morris, N. (2020). Maxi Cover Crop: Maximising the benefits from cover crops through species selection and crop management. Project Report №. 620. AHDB Cereals & Oilseeds.

37. Chen, S., X. Zhang, L. Shao, H., Sun, J., Liu, X. (2020). Effects of straw and manure management on soil and crop performance in North China plain. *Catena*. 187. 104359.
38. Clark, A. (2008). Managing cover crops profitably. DIANE Publishing (3rd ed.).
39. Demyanyuk, O.S., Patyka, V.P., Sherstoboeva, O.V., Bunas, A.A. (2018). Formation of the structure of microbiocenoses of soils agroecosystems depending on trophic and hydrothermic factors. *Biosystems diversity*. 26(2), 103–110.
40. DeWilligen, P., Janssen, B.H., Heesmans, H.I.M., Conijn, J.G., Velthof, G.J., Chardon, W.J. (2008). Decomposition and accumulation of organic matter in soil. Comparison of some models. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1726.
41. Fanish, S.A. (2017). Impact of Green Manure Incorporation on Soil Properties and Crop Growth Environment: A Review. *World Journal of Agricultural Sciences*. 13(3), 122–132.
42. Glibovytska, N., Mykhailiuk, Yu. (2020). Phytoindication research in the system of environmental monitoring. *Ekolohichni nauky*. 2020. 1(28), 111–114.
43. Israt, I.J., Parimal, B.K. (2023). Residual Effect of Green Manure on Soil Properties in Green Manure-Transplant Aman-Mustard Cropping Pattern. *Indian Journal of Agricultural Research*. 57(1), 67–72.
44. Khamare, Y, Chen, J., Marble, S.C. (2022). Allelopathy and its application as a weed management tool: A review. *Frontiers in Plant Science*. 13, 1034649.
45. Lei, B., Wang, J., Yao, H. (2022). Ecological and environmental benefits of planting green manure in paddy fields. *Agriculture*. 12(2), 223.
46. Lin, Y., Ye, G., Kuzyakov, Y., Liu, D., Fan, J., Ding, W. (2019). Long-term manure application increases soil organic matter and aggregation, and alters microbial community structure and keystone taxa. *Soil Biology and Biochemistry*. 134, 187–196.
47. Ma, D., Yin, L., Ju, W., Li, X., Liu, X., Deng, X., Wang, S. (2020). Meta-analysis of green manure effects on soil properties and crop yield in northern China. *Field Crop Research*. 266, 108146.
48. Nisbet, R., Elder, J., Miner, G. (2009). Handbook of Statistical Analysis and Data Mining Applications. Academic Press, Inc., USA.
49. Ohno, T., Doolan, K., Zibilske, L.M., Liebman, M., Gallandt, E. R. Berube, C. (2000). Phytotoxic effects of red clover amended soils on wild mustard seedling growth. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 78, 187–192.
50. Pan, D., Tang, J., Zhang, L., He, M., Kung, C. (2021). The impact of farm scale and technology characteristics on the adoption of sustainable manure management technologies: Evidence from hog production in China. *Journal of Cleaner Production*. 280, 124340.
51. Pedrol, N., Puig, C. G. (2024). Application of Allelopathy in Sustainable Agriculture. *Agronomy*. 14(7), 1362.
52. Qadir, M., Schubert, S., Steffens, D. (2013). Phytotoxic Substances in Soils. *Encyclopedia of Soils in the Environment*, 216–222.
53. Silva, G. T. A., Matos, L. V., Nóbrega, P. de O., Carneiro, E. F., Resende, A. S. de Resende. (2008). Chemical composition and decomposition rate of plants used as green manure. *Scientia Agricola*. 65(3), 298–305.
54. Test Guidelines for the conduct of tests for distinctness, uniformity and stability of Fodder Radish (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.). (2017). TG/178/3, UPOV, Geneva.
55. Tiquia, S. M., Tam, N. F. Y., Hodgkiss, I. J. (1996). Effects of composting on phytotoxicity of spent pig-manure sawdust litter. *Environmental Pollution*, 1996. 93(3), 249–256.
56. Toungos, M. D., Bulus, Z. W. (2019). Cover crops dual roles: Green manure and maintenance of soil fertility, a review. *International Journal of Innovative Agriculture and Biology Research*. 7(1), 47–59.
57. Tsytsiura, Y. (2025). Ecological adaptive tactics of oil radish root formation at different terms of green manure application. *Journal of Ecological Engineering*. 26(9), 420–439.
58. Tsytsiura, Y. (2024). Potential of oilseed radish (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.) as a multi-service cover crop (MSCC). *Agronomy Research*. 22(2), 1026–1070.
59. Tsytsiura, Y., Sampietro, D. (2024). Allelopathic Effects of Annual Weeds on Germination and Seedling Growth of Oilseed Radish (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.). *Acta Fytotechnica et Zootechnica*. 27(1), 77–97.
60. Undersander, D., Mertens, D.R., Thiex, N. (1993). Forage analyses. Procedures. National Forage Testing Association.
61. Zhang, J., Li, P. (2020). Using soil microorganism to construct a new index of soil quality evaluation. *Earth Environment Science*. 440(Nº052023), 1–4.

Дата першого надходження рукопису до видання: 25.09.2025
 Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 30.10.2025
 Дата публікації: 28.11.2025