



УДК 635.15:631.5
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.24>

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ГОЛОВНИХ КОМПОНЕНТ ВПЛИВУ ТРИВАЛОГО ЗАСТОСУВАННЯ РЕДЬКИ ОЛІЙНОЇ ЯК ПРОМІЖНОГО СИДЕРАТУ НА ІНДЕКС ЯКОСТІ ҐРУНТУ

Я. Г. Цицюра¹

Обґрунтовано ефективність та значимість застосування систематичної сидерації для забезпечення процесів ґрунтореабілітації та зниження деградації ґрунтового покриву в активному шарі ґрунтового профілю 0–30 см.

Мета досліджень передбачала тривале оцінювання рівня ефективності використання редьки олійної як сидерату у варіанті проміжного (літнього) її використання з періодичністю раз на два роки в сівоzmіні із загальним циклом досліджень 12 років.

За тривалий період польових досліджень (2014–2025 роки) проведено комплексне оцінювання впливу використання сидеральної надземної та кореневої біомаси редьки олійної на формування агрохімічних, агрофізичних і гідрологічних ознак і властивостей у зіставленні із сумісним динамічним контролем з тим же набором культур у сівоzmіні без застосування сидерації та будь-якого додаткового застосованого удобрення.

За результатами визначення основних властивостей і режимів сірого лісового ґрунту доведена ефективність біоорганічного сидерального проміжного удобрення основних культур у сівоzmіні з періодичністю раз на два роки за використання одновидових сидеральних агрофітоценозів редьки олійної (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.) під культури нехрестоцвітної групи за загортання сидеральної маси на глибину 14–16 см у фазу цвітіння культури. Така система удобрення дозволила за 12-тирічний цикл застосування забезпечити в шарі ґрунту 0–30 см середньорічні темпи динаміки таких показників, як: вміст гумусу – +0,0024%/рік, щільність ґрунту – –0,017 г/см³ на рік, щільність складення ґрунту – –0,014 г/см³ на рік, твердість ґрунту – –0,296 кг/см², загальна пористість – +0,570%/рік, капілярна пористість – +0,252%/рік, некапілярна пористість – +0,319%/рік, пористість аерації ґрунту – +0,393%/рік, водоутримувальна здатність – +0,422%/рік, рН – +0,021 на рік, органічний вуглець – +0,0024%/рік, загальний азот – +0,001%/рік, співвідношення C/N – 0,008 на рік, легкогідролізований азот – +0,897 мг/кг на рік, рухливий фосфор – +1,092 мг/кг на рік, обмінний калій – +1,242 мг/кг на рік, у підсумку забезпечити середній індекс якості ґрунту (SOI) у значенні 0,657 проти 0,460 на вихідному контролі на початку проведення досліджу.

Ключові слова: сидеральний потенціал, біопродуктивність, агрохімічні властивості ґрунтів, агрофізичні властивості ґрунтів, гідрологічні константи ґрунту, індекс якості ґрунту.

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

SYSTEM ANALYSIS OF THE MAIN COMPONENTS OF THE IMPACT OF LONG-TERM USE OF OILSEED RADISH AS AN INTERMEDIATE GREEN MANURE ON THE SOIL QUALITY INDEX

Ya. G. Tsytsiura

The study substantiates the effectiveness and significance of systematic green manuring in ensuring soil rehabilitation processes and reducing soil degradation within the active 0–30 cm layer of the soil profile. The aim of the research was to perform a long-term evaluation of the efficiency of using oilseed radish as a green manure crop in an intermediate (summer) application, with a recurrence once every two years in crop rotation, within a total 12-year experimental cycle.

During the long-term field experiment (2014–2025), a comprehensive assessment was conducted on the use of the aboveground and root biomass of oilseed radish for improving agrochemical, agrophysical, and hydrological soil properties, compared to a control rotation with the same crop set but without green manuring or any additional fertilization.

*The results of the analysis of the main properties and regimes of grey forest soils demonstrated the efficiency of bio-organic intermediate green manuring applied once every two years using monoculture green manure agrocenoses of oilseed radish (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.) under non-Brassicaceae crops. The incorporation of green biomass at a depth of 14–16 cm during the flowering stage contributed to the following average annual dynamics within the 0–30 cm soil layer over the 12-year period: humus content – +0,0024%/year, soil bulk density – –0,017 g/cm³ per year, soil packing density – –0,014 g/cm³ per year, soil hardness – –0,296 kg/cm² per year, total porosity – +0,570%/year, capillary porosity – +0,252%/year, non-capillary porosity – +0,319%/year, soil aeration porosity – +0,393%/year, water-holding capacity – +0,422%/year, pH – +0,021 per year, organic carbon – +0,0024%/year, total nitrogen – +0,001%/year, C/N ratio – +0,008 per year, easily hydrolyzable nitrogen – +0,897 mg/kg per year, available phosphorus – +1,092 mg/kg per year, and exchangeable potassium – +1,242 mg/kg per year.*

As a result, the mean Soil Quality Index (SOI) reached 0,657 compared to 0.460 in the baseline control at the beginning of the experiment.

Key words: green manure potential, biological productivity, agrochemical soil properties, agrophysical soil properties, hydrological soil constants, soil quality index.

Вступ

Сидерація розглядається як комплексна оптимізуєча біоорганічна система утримання ґрунту й удобрення, яка ставить за мету максимальну позитивну імітацію природних процесів акумуляції органічного вуглецю та досягнення цим загального поліпшення комплексу властивостей ґрунту (Lim et al., 2012; Dey & Nath, 2015; Abdulraheem & Tobe, 2022; Ansari et al., 2022).

Формування позитивних результатів сидерації має поліфакторну основу й залежить від чинників гідротермічних умов території, видових адаптивних властивостей рослин-сидерату та біохімічного складу її листостеблової та кореневої маси, а також від технології самої сидерації (Clark, 2008; Florentin et al., 2010; Hansen et al., 2021). Важливим у цьому плані є також стан ґрунтового профілю, розвинутість відповідних ґрунтових режимів з позиції оптимальності та доцільності, а також характер інтенсивності переважання процесів аеробної акумуляції над процесами інтенсивної мінералізації та анаеробної ферментації – основних результуючих

чинників, які визначають позитивно-динамічне гумусонакопичення (De Willigen et al., 2008; Das et al., 2020; Kucerik et al., 2024).

З позиції дослідження сидерації доцільним є вивчення позитивного її впливу на ґрунти не в розрізі окремих ознак і властивостей ґрунту, а в застосуванні комплексного підходу, який передбачає вивчення спряжених системних ознак і властивостей, які в кінцевому варіанті дії визначають формування ґрунтових режимів, оптимізованих для реабілітації ґрунтів, зниження внутрішньопрофільної ґрунтової деградації та гарантування відновлення потенціалу ґрунтової родючості (Deus et al., 2022; Lei et al., 2022; Indoria et al., 2025).

Важливим, з позиції ефективних сидеральних технологій, є підбір відповідного виду сидерату, який, з одного боку, є адаптованим до умов його прямого сидерального використання, а з іншого – сприяє отриманню позитивного ефекту від застосування в найбільш доступному короткочасному періоді (Li et al., 2019; Naz et al., 2023; Israt & Parimal, 2023).

Серед понад 60 видів рослин-сидератів найбільш широкого застосування набули бобові та хрестоцвіті види, які поєднують позитивні риси високого вмісту білкових і азотистих сполук, що гарантує оптимізований параметр співвідношення C/N для формування оптимальної динаміки розкладення сидеральної маси у ґрунті з переважанням процесів акумуляції, а також володіють комплексом цінного портфоліо біохімічного складу за ознаками зольності та структурованості, співвідношення макро- та мікроелементів (Silva et al., 2008; Liu et al., 2020; Singh et al., 2023).

Варто також урахувати додатковий позитивний вплив підбраного сидерату на комплекс властивостей ґрунту завдяки розвитку визначеної морфометрії кореневих систем, формуванню відповідної ризосфери та сприянню зміні мікробіологічного потенціалу ґрунту з огляду на можливий варіант симбіотичної та синергічної взаємодії з окремими групами ґрунтових мікроорганізмів (Toungos & Bulus, 2019; Suon et al., 2023; Xu et al., 2023; Tsytsiura, 2024a; Wang et al., 2024).

Відмічено необхідність оцінювання біопродуктивного потенціалу рослини-сидерату з огляду на лімітацію гідротермічних ресурсів території, толерантність до строків сівби та сидерального використання, біологічні особливості культури у варіантах проміжного використання в літньо-осінній період (Ma et al., 2020; Rani et al., 2021; Yadav et al., 2021; Zhang et al., 2025).

З позиції вищевикреслених чинників редька олійна, відповідно до тривалого вивчення в умовах нестійкого зволоження на ґрунтах низького та середнього потенціалу родючості, зарекомендувала себе як ефективний кандидат до застосування в сидеральних технологіях за основного і проміжного терміну використання в сівозмінах різної ротації за допустимого її насичення іншими видами хрестоцвітих сільськогосподарських культур (Tsytsiura, 2024b). Цінним також є збереження принципів мультифункціональності з позиції як потенційних можливостей застосування сформованої надземної та кореневої біомаси, так і напряму та характеру впливу на ґрунтовий профіль з можливим пролонгуючим і стійким позитивним характером впливу (Tsytsiura, 2025).

Маловивченим питанням є дослідження ефективності систематичного сидерального застосування редьки олійної на тому самому

полі за відповідного циклу використання щодо формування комплексу агрофізичних, агрохімічних і гідрологічних властивостей ґрунту в період відповідної ротації дослідної сівозміни без включення хрестоцвітих видів рослин, що й стало метою проведених тривалих досліджень на сірих лісових ґрунтах в умовах нестійкого зволоження в рамках виконання етапів державної тематики «Розробка екологоорієнтованих технологій вирощування біоенергетичних культур для забезпечення енергонезалежності та ґрунтозбереження задля формування кліматичної нейтральності» (№ держреєстрації 0124U000483).

Матеріал і методи

Місце проведення досліджень відповідало зоні північної підпровінції правобережної центальної високої провінції (агроґрунтове шифрування АС2₁) з повним циклом у 12 років (2014–2025 рр.) у межах дослідного поля Вінницького національного аграрного університету (місце локації N 49°11'31", E 28°22'16"), на сірих лісових ґрунтах. Показники агрохімічної забезпеченості ґрунтового покриву відповідали середньому потенціалу із вмістом гумусу на рівні 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.

Схема досліду включала багатofакторну схему вивчення систематичного застосування проміжної літньої сидерації за використання редьки олійної в сівозмінах без наявності інших видів хрестоцвітих культур. Дослідження проводились за відсутності будь-якого додаткового застосування мінеральних добрив за винятком власне сидерації під такі культури та роки в таких ланках сівозміни: сорго зернове (2014 р.) – горох (2016 р.) – соя (2018 р.) – соняшник (2020 р.) – нут (2022 р.) – кукурудза на зерно (2024 р.). Загальна схема сівозміни в досліді за період оцінювання: сорго зернове (після гороху) – ярий ячмінь – горох – ярий ячмінь – соя – яра пшениця – соняшник – озимий горох – нут – ярий ячмінь – кукурудза на зерно.

Облік показників було проведено у три часові інтервали за загальний період досліду, у 2014 р. – на початку проведення досліду, проміжний етап – 2019 р., заключний етап – 2025 р. (навесні до посіву відповідної культури згідно зі схемою чергування). Схема досліду представлена в таблиці 1.

Облікова площа індикації ґрунтових показників 25 м² за чотириразового пов-

торення. Редька олійна була представлена сортом кмбінованого використання Журавкою за сидерального способу формування агроценозу редьки олійної – кількісна норма висіву 2,5 млн схожих насінин/га з міжряддям 15 см за комбінованого обробітку ґрунту після збору попередника на глибину 12–16 см. Сидеральне загортання листостеблової маси редьки олійної на глибину 14–16 см (із застосуванням важких дискових борін БДН-2,4) було проведено за досягнення рослинами фенологічної фази цвітіння за попереднього підкошування листостеблової маси сидерату з подрібненням.

Облік надземної продуктивності сидерату проводили методом обікових ділянок (1 м² по 4 ділянки для кожного повторення) шляхом прямого зважування після видалення сторонніх іншовидових рослинних домішок. Облік сформованої кореневої біомаси проводили із застосуванням методу мікромонолітів, що адаптований для сидеральних агроценозів редьки олійної (Tsytsiura, 2024b; Tsytsiura, 2025). Переведення сформованої надземної та кореневої біомаси проводили на підставі висушування до постійної ваги (стандартний режим $t = 105\text{ }^{\circ}\text{C}$, подальшого озолення за $t = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Еквівалентне переведення сформованої загальної біомаси рослин у формат класичного органічного добрива тваринного

походження здійснено згідно із тривалим біохімічним оцінюванням рослин редьки олійної (Tsytsiura, 2024b) та рекомендаціями щодо еталонних параметрів видів органіки (Brown, 2021; Composts & Fertilizers, 2023).

Відбір зразків ґрунту для формування індикаційних показників його властивостей проводили з інтервалом у 10 см на глибину до 30 см, із застосуванням стандартних рекомендованих способів (Carter & Gregorich, 2008).

Щільність ґрунту (ρ , г/см³) була визначена на підставі гравіметричного методу за використання циліндрів Копецького в результаті вираження відношення маси сухого ґрунту до його об'єму (Borek, 2019). Щільність складення ґрунту ($\rho_{\text{ск}}$, г/см³) визначали відповідно до європейського протоколу (ASTM-D854, 2010 р.).

Твердість ґрунту (T , кг/см²) визначали за використання пенетрометра “Walcom FM-204TR” з обліком середнього для п'яти визначень з кожного горизонту в кожному повторенні варіантів дослідів.

Капілярну пористість ґрунту ($P_{\text{к}}$, %), некапілярну пористість ґрунту ($P_{\text{нк}}$, %) та пористість аерації ($P_{\text{а}}$, %) визначали стандартними лабораторно-розрахунковими методами (Spasić et al., 2023). Загальну пористість ґрунту ($P_{\text{з}}$, %) калькулювали як загальну суму $P_{\text{к}}$ та $P_{\text{нк}}$.

Таблиця 1

Загальна схема дослідів вивчення впливу систематичної сидерації за використання редьки олійної на інтегральні показники якості ґрунту

Назва варіанту	Технологічний зміст варіанту
Абсолютний контроль	Відбір зразків ґрунту з ділянок на комплексний аналіз до початку проведення дослідів (базові вихідні параметри дослідів)
Контроль I	Вирощування культур на ділянках без сидерації з таким чергуванням: сорго зернове (2014 р.) – ярий ячмінь (2015 р.) – горох (2016 р.) – ярий ячмінь (2017 р.) – соя (2018 р.)
Сидерація I	Таке саме чергування культур на ділянці, що й у варіанті Контроль I, із застосуванням сидерації під такі культури: сорго зернове (2014 р.) – горох (2016 р.) – сою (2018 р.)
Рубіжний контроль показників ґрунту для варіантів Контроль I та Сидерація I у 2019 р. до посіву основної культури	
Контроль II	Вирощування культур на ділянках без сидерації з таким чергуванням (продовження варіанту Контроль I): яра пшениця (2019 р.) – соняшник (2020 р.) – озимий горох (2021 р.) – нут (2022 р.) – ярий ячмінь (2023 р.) – кукурудза на зерно (2024 р.)
Сидерація II	Таке саме чергування культур на ділянці, що й у варіанті Контроль II, із застосуванням сидерації під такі культури: соняшник (2020 р.) – нут (2022 р.) – кукурудзу на зерно (2024 р.)
Рубіжний контроль показників ґрунту для варіантів Контроль II та Сидерація II у 2025 р. до посіву основної культури	

Водоутримувальну здатність ґрунту (ВЗ, %) визначали стандартним лабораторним методом (Dobriyal et al., 2012; Gould, 2024).

Найменша вологоємність ґрунту (НВГ, %) визначена на підставі методики, деталізованої Gould (2024 p.).

Електропровідність ґрунту (Е, 0,1 см/м), визначали кондуктометрично за використання кондуктометра-солеміра (EZODO-8200 М (EZODO, Тайвань)).

Вміст гумусу (Г, %) було визначено відповідно до національного стандарту (ДСТУ 4289:2004, 2005).

Вміст легкогідролізованого азоту (N_a , мг/кг), рухомого фосфору (Р, мг/кг), обмінного калію (К, мг/кг) було визначено відповідно до аналітичного припису для агрохімічних лабораторій від 2014 р. (відповідно до ДСТУ 7863:2015, 2016; ДСТУ 4115–2002, 2003). Показник pH_{KCl} (сольове) було визначено також за національним стандартом (ДСТУ ISO 10390–2007, 2009 (ідентичний міжнародному стандарту ISO 10390:2005)).

Груповий і фракційний склад гумусу ґрунту визначався за методом І.В. Тюріна в модифікації В.В. Пономарьової та Т.А. Плотникової, спалюванням за Б.А. Нікітіним (варіант Національного наукового центру «Інститут ґрунтознавства та агрохімії» Національної академії аграрних наук України із визначенням вмісту гумінових кислот ($C_{гк}$, % від вмісту органічного вуглецю ($C_{орг}$)), фульвокислот ($C_{фк}$, % від вмісту органічного вуглецю ($C_{орг}$)), залишку (C_3 , % (як різниця між $C_{гк}$ та $C_{фк}$)) та співвідношення $C_{гк}/C_{фк}$ (ДСТУ 7828:2015, 2016).

Вміст органічного вуглецю розраховувався як відношення вмісту гумусу (Г, %) до коефіцієнта 1,724 відповідно до стандартних рекомендацій (ДСТУ 7828:2015, 2016).

Для визначення загального вмісту азоту ($N_{зар}$) було застосовано метод Кельдаля (АОАС, 1995).

Показник відношення $C_{орг}/N_{зар}$ розраховували як відношення вмісту органічного вуглецю ($C_{орг}$, %) до загального азоту ($N_{зар}$, %).

Індекс якості ґрунту (у загальній міжнародній транскрипції – Soil Quality Index (SQI)) визначали відповідно до моделі нелінійного вагування критеріїв (w_i) значущості ознак і властивостей (Uthappa et al., 2024) за рівнянням 1, а нормалізацію S_i відповідно до рівняння 2:

$$SQI = \sum_{i=1}^n w_i \times S_i, \quad (1)$$

де: n – число параметрів (показників), w_i – факторна вага i -того параметра (показника); S_i – нормалізований i -тий параметр (показник).

$$S_i = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{X}{X_0}\right)^b\right]}, \quad (2)$$

де: X – фактичний показник; X_0 – середнє значення показника в масиві даних; b – нахил кривої нормалізації у значенні $-10,5$ для показника в логістичному значенні «більше – краще» та $+10,5$ для показника «менше – краще».

Вагові значення w_i були отримані застосуванням PCA аналізу (так званий метод аналізу головних компонент) як відношення спільних характеристик i -го показника до суми спільних характеристик усіх показників (Iheshiulo et al., 2024).

Рівень спільності факторів (communality) визначали відповідно до (Zhang et al., 2025) за рівнянням 3:

$$Communality_i = l_{i1}^2 + l_{i2}^2 + \dots + l_{ik}^2, \quad (3)$$

де: l_{ij} – факторне навантаження змінної i на компоненту j , k – кількість компонент PCA аналізу.

Для оцінювання гідротермічних режимів за загальний період досліджень було застосовано такі показники, як: середньодобова температура ($^{\circ}C$), кількість опадів (мм), гідротермічний коефіцієнт (далі – ГТК) (рівняння 4), коефіцієнт значущості відхилень (C_{sd}) (рівняння 5) (табл. 2):

$$ГТК = \frac{\sum R}{0.1 \times \sum t_{>10}}, \quad (4)$$

де: $\sum R$ – сума опадів за період з температурою вище за $10^{\circ}C$, $\sum t_{>10}$ – сума ефективних температур за період досліджень. Рейтингування режиму погоди за показником умов за значенням ГТК: $>1,6$ – надмірно вологий, $1,3-1,6$ – вологий, $1,0-1,3$ – помірно сухий, $0,7-1,0$ – сухий, $0,4-0,7$ – дуже сухий.

$$C_{sd} = \frac{(X_i - X_{av})}{S}, \quad (5)$$

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.

Таблиця 2

Оцінка гідротермічного режиму періоду досліджень
(зона Dfa/Dfb за кліматично-режимною класифікацією Кеппена – Гейгера), 2014–2024 рр.

Рік	Сума опадів, мм (IV-X)	t_{aver}^* , °C (IV-X)	Місяці періоду вегетації										$C_{sd\ aver}$ V-IX	t_{aver}^* , °C	**Сума опадів, мм
			V		VI		VII		VIII		IX				
			X_i	C_{sd}	X_i	C_{sd}	X_i	C_{sd}	X_i	C_{sd}	X_i	C_{sd}			
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

* – середня середньодобова температура (°C) за період листопад попереднього року – березень наступного; ** – сума опадів (мм) за період листопад попереднього року – березень наступного.

Статистичне оцінювання результатів досліджень передбачало використання базових показників варіаційної статистики (Wong, 2018), використання таких показників, як: середнє арифметичне, стандартне відхилення (SD), коефіцієнт варіації (C_v) (для $p < 0,05$), з розрахунком у програмі “Statistica 10” (StatSoft – Dell Software Company, США). Для визначення та відображення істотності різниці між значеннями облікових показників між варіантами було застосовано кореляційний і дисперсійний методи аналізу з розрахунком найменшої істотної різниці (НІР для $p < 0,05$).

Результати

Оцінення біопродуктивності редьки олійної за період досліджень підтвердило її ефективність як проміжного сидерального компонента за використання на ґрунтах з невисоким потенціалом родючості для умов нестійкого зволоження (табл. 3). Це підтверджено результатами середнього за період досліджень досяжного потенціалу загальної біопродуктивності як у сирій (24,01 т/га), так і в сухій речовині (4,02 т/га), що відповідало середньому еквіваленту класичного гною ВРХ на рівні 14,41 т/га.

Водночас визначена варіативність показників біопродуктивності за параметром коефіцієнта варіації (34,96% для виразу в сирій речовині, 31,93% для виразу в сухій речовині, 34,95% для еквівалента у виразі класичної органіки) вказує на істотний вплив гідротермічних умов періоду вегетації редьки олійної від повних сходів до початку її сидерального використання. Це підтверджено результатами визначених кореляційних залежностей між масивом гідротермічних умов у роки сидерального застосування редьки олійної (див. табл. 3) з усередненими параметрами погодних умов (див. табл. 2). За результатами такого кореляційного зіставлення біопродуктивності редьки олійної як у сирому, так і в сухому виразах вона має тісну пряму залежність з кількістю опадів 0,741 (за $p < 0,01$) та 0,654 (за $p < 0,01$) відповідно, обернену залежність від рівня середньодобової температури: -0,896 (за $p < 0,01$), -0,936 (за $p < 0,01$) відповідно.

На підставі сформованого за період досліджень масиву даних встановлено істотний позитивний вплив варіанту систематичної сидерації за використання редьки олійної на формування як агрофізичних, так і агрохімічних властивостей ґрунту

Таблиця 3

Сидеральна біопродуктивність редьки олійної в досліді (на феностадію цвітіння)

Сидеральна біопродуктивність	Рік досліді із сидерацією							
	2014	2016	2018	2020	2022	2024	Середнє	НР _{0.5}
Загальна біопродуктивність рослин (надземна та коренева біомаса), т/га	28,8	26,82	28,64	14,38	32,8	12,61	28,8	1,15
Загальна біопродуктивність рослин (надземна та коренева біомаса) у сухій речовині, т/га	4,83	4,69	4,74	2,52	5,09	2,23	4,83	0,33
Приблизний еквівалент класичного гною ВРХ, т/га	17,28	16,10	17,18	8,63	19,68	7,57	14,41	0,84

(табл. 4). Зокрема, у зіставленні з варіантами без сидерації вміст гумусу мав виражену спадну динаміку з роками, у середньому для горизонту 0–30 см – $-0,021\%/рік$ за період 2014–2025 рр. Навпаки, у варіанті сталого сидерального використання редьки олійної показник мав прирістний характер для шару ґрунту 0–30 см на рівні $0,024\%/рік$. Позитивними є також структурні зрушення у співвідношенні гумінових і фульвокислот у структурі органічного вуглецю. Визначено, що систематичне застосування редьки олійної як сидерату, відповідно до схеми досліді, забезпечило усереднене зростання для горизонту 0–30 см вмісту гумінових кислот на $5,58\%$, на відміну варіанту без сидерації, де визначено зворотний характер формування показника зі зниженням частки гумінових кислот у середньому на $3,35\%$. Такий характер формування структури гумусових сполук сформував істотно відмінну динаміку у співвідношенні гумусових і фульвокислот у загальній структурі гумусу ($C_{гк}/C_{фк}$) – приріст на рівні до 29% на рубіжну дату обліку (2025 р.) для варіанту з послідовним сидеральним використанням редьки олійної та динамічне зниження до 14% за тієї ж системи порівняння у варіантів без сидерації. Відмічено також позитивні баланси вмісту як загального азоту ($N_{заг}$), так і доступних форм основних макроелементів (NPK). Так, у порівнянні варіантів Сидерація II й Абсолютний контроль (на 2025 р.) у середньому для товщини ґрунтового профілю 0–30 см відмічено загальне зростання $N_{заг}$ на $11,06\%$. За зіставлення варіантів Абсолютний контроль та Контроль II відмічено обернений характер формування показника за середньобаторічного зниження вмісту $N_{заг}$ на рівні $3,15\%$.

З урахуванням визначеної динаміки для вмісту гумусу (отже, і для органічного вуглецю) та загального азоту було сформовано передумови для істотного зниження показника $C_{орг}/N_{заг}$ у варіанті без застосування сидерації в середньобаторічному вимірі на $9,81\%$ у зіставленні з абсолютним контролем на фоні загального зростання показника на $10,75\%$ у варіанті за послідовної сидерації.

Позитивною була й динаміка азоту, фосфору та калію у варіантах сидерального використання редьки олійної (див. табл. 4). Так, у зіставленні з абсолютним контролем у середньому для шару ґрунту 0–30 см приріст вмісту легкогідролізованого азоту був $13,97\%$, рухомого фосфору – до 25% , обмінного калію – до 23% .

Позитивним є також зниження кислотності ґрунту за використання редьки олійної у формі сидерату – за повний цикл досліді на 2025 р. у зіставленні з абсолютним контролем для варіанту систематичної сидерації встановлено зниження показника рН на $4,30\%$ за оберненої тенденції зростання на $2,81\%$ у варіанті без сидерації.

Закономірно, що позитивні процеси підвищення концентрації макроелементів, оптимізація ємності вбирання, активізація катіонно-аніонного вбирання ґрунтом і зміна у структурі гумусових сполук вплинули й на рівень електропровідності ґрунту, яка завдяки підвищеній гумусованості й іммобілізації мікроелементів у складні халатні біоорганічні комплекси мала тенденцію до зниження для шару ґрунту в 0–30 см порівняно з варіантами Абсолютний контроль та Сидерація II на $3,39\%$.

Встановлена тенденція до зниження гумусованості ґрунту на фоні погіршення структури гумусу, зниження вмісту макро-

Таблиця 4
Масив параметрів властивостей ґрунту за різних варіантів дослідів
(для етапів обліку 2014/2019/2025 рр.)

Варіант дослідів	Шар ґрунту, см	Г, %	C _{опр} , %	C _{тк} , % (від C _{опр})	C _{фк} , % (від C _{опр})	C _з , % (від C _{опр})	C _{тк} : C _{фк}	N _{зар} , %	C _{опр} /N _{зар}	N, мг/кг	P, мг/кг	K, мг/кг	pH _{ккл}	E _і , 0,1 см/м
2014 р.														
Абсолютний контроль	0-10	2,68 ^a	1,555 ^a	42,37 ^a	30,04 ^a	27,59 ^a	1,410 ^a	0,151 ^a	10,29 ^a	85,3 ^a	177,5 ^a	118,8 ^a	5,82 ^a	0,285 ^a
	10-20	2,56 ^b	1,485 ^b	41,92 ^a	31,61 ^b	26,47 ^b	1,326 ^b	0,141 ^a	10,53 ^a	83,7 ^a	179,1 ^a	110,8 ^b	5,84 ^a	0,281 ^a
	20-30	2,15 ^c	1,247 ^c	40,84 ^b	32,75 ^c	26,41 ^b	1,247 ^c	0,125 ^b	9,98 ^b	77,4 ^b	171,6 ^b	105,7 ^c	5,73 ^b	0,319 ^b
2019 р.														
Контроль І*	0-10	2,61 ^a	1,514 ^a	41,21 ^a	31,18 ^a	27,61 ^a	1,322 ^a	0,147 ^a	10,30 ^a	81,3 ^a	163,7 ^a	110,4 ^a	5,71 ^a	0,234 ^a
	10-20	2,47 ^b	1,433 ^b	40,88 ^b	31,14 ^a	27,98 ^a	1,313 ^a	0,132 ^b	10,85 ^a	77,5 ^b	167,2 ^a	104,1 ^b	5,73 ^a	0,262 ^b
	20-30	2,03 ^c	1,177 ^c	39,77 ^b	32,59 ^b	27,64 ^a	1,220 ^b	0,124 ^b	9,50 ^c	71,2 ^c	161,4 ^b	95,3 ^c	5,85 ^b	0,289 ^b
Сидерація І**	0-10	2,84 ^a	1,647 ^a	45,71 ^a	30,25 ^a	24,04 ^a	1,511 ^a	0,159 ^a	10,36 ^a	95,7 ^a	180,2 ^a	122,3 ^a	5,87 ^a	0,251 ^a
	10-20	2,71 ^b	1,572 ^b	45,58 ^a	30,43 ^a	23,99 ^a	1,498 ^a	0,157 ^a	10,01 ^a	86,9 ^b	187,5 ^b	117,4 ^b	5,94 ^b	0,272 ^a
	20-30	2,35 ^c	1,363 ^c	44,21 ^b	30,69 ^a	25,10 ^b	1,441 ^b	0,145 ^b	9,40 ^b	80,5 ^c	177,3 ^a	120,7 ^a	6,00 ^b	0,301 ^b
2025 р.														
Контроль І***	0-10	2,36 ^a	1,369 ^a	38,97 ^a	32,96 ^a	28,07 ^a	1,182 ^a	0,143 ^a	9,57 ^a	73,8 ^a	151,8 ^a	105,7 ^a	5,63 ^a	0,218 ^a
	10-20	2,28 ^a	1,323 ^a	38,15 ^b	33,29 ^a	28,56 ^b	1,146 ^a	0,137 ^a	9,65 ^a	68,9 ^b	152,7 ^a	102,4 ^a	5,68 ^a	0,237 ^a
	20-30	1,98 ^b	1,148 ^b	37,91 ^b	34,27 ^b	27,82 ^a	1,106 ^b	0,134 ^b	8,57 ^b	65,8 ^c	146,9 ^b	100,6 ^b	5,87 ^b	0,259 ^b
Сидерація І****	0-10	2,92 ^a	1,694 ^a	47,53 ^a	28,12 ^a	24,35 ^a	1,690 ^a	0,157 ^a	10,79 ^a	102,3 ^a	184,4 ^a	127,7 ^a	5,95 ^a	0,263 ^a
	10-20	2,78 ^b	1,613 ^b	47,28 ^a	27,09 ^b	25,63 ^b	1,745 ^b	0,154 ^a	10,47 ^a	92,8 ^b	193,7 ^b	121,4 ^b	6,07 ^b	0,285 ^b
	20-30	2,54 ^c	1,473 ^c	46,84 ^a	27,32 ^b	25,84 ^b	1,714 ^a	0,150 ^a	9,82 ^b	83,6 ^c	189,4 ^c	130,9 ^a	6,12 ^b	0,307 ^c

Продовження таблиці 4

Варіант досліджу	Шар, см	ЩГ, г/см ³	ЩСТ, г/см ³	ТГ, кг/см ²	Р _к , %	Р _{нк} , %	Р _а , %	Р _з , %	НВГ, %
2014 р.									
Абсолютний контроль	0-10	1,32 ^a	2,55 ^a	13,51 ^a	26,36 ^c	20,44 ^a	21,54 ^a	23,87 ^a	23,41 ^a
	10-20	1,36 ^b	2,57 ^a	16,17 ^b	26,78 ^a	19,78 ^b	18,64 ^b	26,62 ^b	23,08 ^a
	20-30	1,45 ^c	2,62 ^b	19,56 ^c	25,35 ^b	18,53 ^b	14,98 ^c	28,47 ^c	21,81 ^b
2019 р.									
Контроль Г	0-10	1,37 ^a	2,61 ^a	15,29 ^a	24,74 ^a	19,74 ^a	20,43 ^a	21,54 ^a	22,02 ^a
	10-20	1,41 ^b	2,63 ^a	18,39 ^b	25,29 ^a	19,15 ^a	17,17 ^b	24,51 ^b	21,15 ^b
	20-30	1,49 ^c	2,65 ^a	19,44 ^b	23,28 ^b	18,47 ^a	12,22 ^c	27,11 ^c	20,29 ^c
Сидерація Г**	0-10	1,18 ^a	2,48 ^a	11,24 ^a	27,22 ^a	23,17 ^a	23,61 ^a	24,29 ^a	24,85 ^a
	10-20	1,22 ^b	2,51 ^a	14,87 ^b	29,14 ^b	21,17 ^b	20,48 ^b	28,15 ^b	23,08 ^b
	20-30	1,29 ^c	2,54 ^b	16,24 ^b	28,84 ^b	19,63 ^c	18,07 ^b	30,53 ^c	22,77 ^b
2025 р.									
Контроль П***	0-10	1,42 ^a	2,65 ^a	16,18 ^a	24,72 ^a	18,41 ^a	18,23 ^a	20,37 ^a	20,51 ^a
	10-20	1,45 ^a	2,67 ^a	19,81 ^b	25,19 ^a	17,12 ^b	15,47 ^b	23,86 ^b	19,34 ^b
	20-30	1,49 ^b	2,72 ^b	21,96 ^c	23,92 ^b	16,85 ^b	11,15 ^c	28,79 ^c	18,34 ^c
Сидерація П****	0-10	1,14 ^a	2,39 ^a	10,12 ^a	28,18 ^a	24,59 ^a	25,59 ^a	27,63 ^a	25,45 ^a
	10-20	1,17 ^a	2,41 ^a	12,24 ^b	29,89 ^b	23,55 ^b	23,48 ^b	33,59 ^b	24,31 ^b
	20-30	1,22 ^b	2,44 ^a	13,21 ^b	29,48 ^b	22,08 ^b	20,22 ^c	32,93 ^b	23,82 ^b

Примітка. Різні малі літери в таблиці вказують на істотні відмінності між варіантами дослідів між шарами ґрунту для того самого варіанту (для рівня значущості $p < 0,05$).

елементів і супутніх негативних процесів у ґрунтовому профілі характерна для варіанту без сидерації, протилежні процеси у варіантах із застосуванням сидерації – позитивно відобразились на формуванні агрофізичних властивостей ґрунту в аналізованому шарі 0–30 см у варіанті із систематичною періодичною сидерацією у сталій послідовній динаміці за період 2014–2025 рр., за зіставлення вихідних показників на рівні абсолютного контролю та у варіанті Сидерація II на кінцеву дату обліку (2025 р.). Так, встановлено в середньому для шару ґрунту 0–30 см зниження щільності ґрунту (ЩГ) на 19,05%, щільності складення ґрунту (ЩСГ) на 9,95%, твердості ґрунту (ТГ) на 33,95% за одночасного зростання показників капілярної пористості (P_k) на 18,63%, некапілярної пористості ($P_{нк}$) на 34,06%, пористості аерації (P_a) – на 57,83%. Для варіанту без сидерації аналогічні показники, навпаки, продемонстрували обернену динаміку (див. табл. 4) у значеннях: +5,65, +3,88, +18,18, –5,93, –10,82, –19,31% відповідно.

Визначена динаміка зміни видів пористості сірого лісового ґрунту в досліді сприяла відповідним зрушенням і за такими показниками, як водоутримувальна здатність ґрунту (ВЗ) та найменша вологоємність ґрунту (далі – НВГ). Що стосується водоутримувальної здатності, то застосуванням сидерації було досягнуто середній для шару ґрунту 0–30 см приріст показника на рівні 30,27% за повний цикл досліджень. У варіанті без сидерації було відмічено зниження показника на 21,37% за тих же варіантів зіставлення. Подібні особливості спостережено й для показника НВГ – зростання на 7,72% у варіанті систематичної сидерації та зниження на 14,81% у варіанті без її застосування.

Визначена істотність впливу варіантів досліді на масив облікованих показників і властивостей ґрунту з огляду на результати статистичного зіставлення на рівні $p < 0,05$ дозволила застосувати метод оцінювання на підставі аналізу головних компонент (у міжнародній аббревіатурі – PCA метод). Результати такого аналізу відповідно до стандартної процедури в пакеті програми “Statistica 10” представлено в таблиці 5.

Відповідно до визначених вагових значень параметрів варіант двокомпонентного аналізу цілком задовольняє умову не менш як 80% рівня загальної кумулятивної дисперсії обох компонент, а індивідуальні зна-

чення ваги облікових параметрів ґрунту підтвердили додатково їхню значимість щодо формування результуючого показника якості ґрунту, відповідно до номінального їх значення в загальній системі PCA аналізу.

У результуючому підсумку підтверджено ефективність застосування редьки олійної як сидерату у варіанті біоорганічного удобрення та відновлення ґрунтів за їх агрофізичної та агрохімічної деградації на основі отриманого результуючого показника індексу якості ґрунту (SQI) для досліджуваних горизонтів ґрунтового профілю в розрізі застосованих варіантів досліді (рис. 1).

Отриманий показник якості ґрунту, у розрізі варіантів досліді, підтвердив наші узагальнення щодо позитивно формувальних ефектів впливу сидерації на інтегральний підсумок збереження та відновлення ґрунтових умов родючості. Зокрема, за систематичного сидерального використання редьки олійної, порівняно з варіантом абсолютного контролю, досягнуто ріст показника SQI за повний цикл досліджень з індексом 1,428. Напаки, для варіанту без сидерації відмічено зменшення показника з індексом зниження на рівні 0,623.

Обговорення

Встановлений бажаний рівень біопродуктивності сидеральних культур для гарантування ґрунтореабілітаційних і ґрунтополіпшувальних процесів за літнього строку їх використання (проміжний у сівозміні тип сидерації) становить не менше ніж 2,5 т/га загальної сухої речовини з еквівалентом трансформації до класичних органічних добрив на рівні 9–10 т/га (Creamer & Baldwin, 1997; Israt & Parimal, 2023). За результатами проведеного багаторічного сидерального оцінювання редьки олійної підтверджено її високий агротехнологічний сидеральний потенціал поряд із традиційними хрестоцвітими видами (гірчиця біла, ріпак ярий), які застосовуються в умовах нестійкого зволоження Правобережного Лісостепу на сірих лісових ґрунтах.

Отримані результати зростання гумусованості ґрунтового профілю позитивно співвідносяться з результатами різнорегіональних оцінювань впливу інших видів хрестоцвітих сидератів на динамічну зміну вмісту гумусу у значенні від 0,014 до 0,054%/рік залежно від оптимальності гідротермічних умов періоду сидерального вирощування відповідного виду сидерату (Stroud et al., 2024). Зважаючи на рівень зміни гумусованості ґрунтового профілю в динаміці років

Таблиця 5

Складники аналізу головних компонент впливу систематичної, з періодичним технологічним характером сидерації за використання редьки олійної на головні параметри якості ґрунту (за сформованим масивом даних у період обліків 2014–2025 рр. за процедури нелінійної нормалізації PCA)*

Облікові параметри ґрунту*	Принципова компонента 1 (PC1)	Принципова компонента 2 (PC2)	Спільність (Communality)	Вагові коефіцієнти параметрів (w_i)	Облікові параметри ґрунту	Принципова компонента 1 (PC1)	Принципова компонента 2 (PC2)	Спільність (Communality)	Вагові коефіцієнти параметрів (w_i)
Г, %	0,900	-0,411	0,979	0,049	pH _{KCl}	-0,720	-0,602	0,880	0,044
C _{орг} , %	0,900	-0,411	0,979	0,049	E, 0,1 см/м	0,278	0,819	0,749	0,038
C _{гк} , %	0,981	0,151	0,984	0,050	ЩГ, г/см ³	0,982	-0,025	0,965	0,049
C _{фк} , %	0,934	0,077	0,879	0,044	ШСГ, г/см ³	0,981	0,078	0,968	0,049
C _з , %	0,814	0,215	0,709	0,036	ТГ, кг/см ²	0,929	-0,257	0,930	0,047
C _{гк} : C _{фк}	0,982	0,119	0,978	0,049	P _к , %	0,899	0,261	0,876	0,044
N _{заг} , %	0,858	-0,323	0,841	0,042	P _{нк} , %	-0,976	0,080	0,959	0,048
C _{орг} : N _{заг}	0,637	-0,392	0,560	0,028	P _а , %	0,909	-0,379	0,969	0,049
N, мг/кг	0,953	-0,176	0,938	0,047	P _з , %	0,989	0,090	0,987	0,050
P, мг/кг	0,928	0,230	0,915	0,046	BЗ, %	0,387	0,886	0,936	0,047
K, мг/кг	0,950	0,036	0,904	0,046	НВГ, %	0,960	-0,047	0,925	0,047
Власне номінальне значення						16,917	2,890	–	
Частка дисперсії						76,897	13,138		
Кумулятивний рівень дисперсії						76,897	90,035		

* Розшифровка показників представлена в розділі «Матеріал і методи» даної статті.

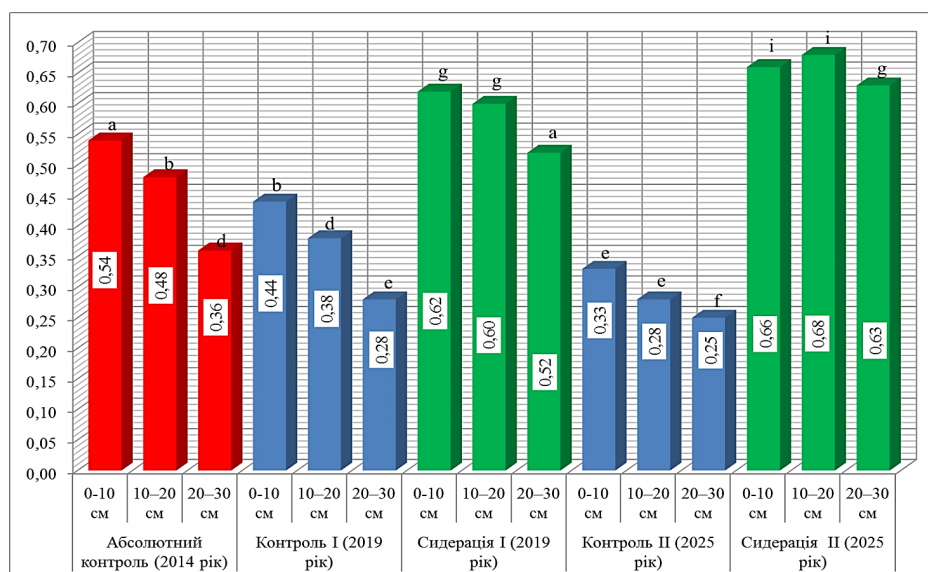


Рис. 1. Індекс якості ґрунту (SQI) за результатами тривалого оцінювання в межах варіантів дослідження, 2014–2025 рр. (розшифровка варіантів дослідження представлена в таблиці (див. табл. 1). Різні малі літери над колонками графіка вказують на істотні відмінності між варіантами дослідження за показником SQI на рівні значущості $p < 0,05$)

оцінювання, редька олійна демонструє істотно високі темпи гумусонакопичення, які не поступаються традиційним і широкоживим хрестоцвітним видам сидератів, зокрема такій поширеній культурі, як гірчиця біла. Це відкриває можливість для ефективного застосування редьки олійної в сидеральних технологіях, з огляду на її потенціал з багатоцільового використання (Tsytsiura, 2024a). Отриманий показник $C_{\text{орг}}/N_{\text{заг}}$ у сидеральному утриманні ґрунту за участі редьки олійної в кінцевому циклі досліду (на 2025 р.) в інтервалі 9,5–11, а також переважання у співвідношенні $C_{\text{гк}}/C_{\text{фк}}$ частки гумінових кислот позитивно співвідносяться з висновками щодо позитивно-спрямованих агротехнологічних варіантів сидерації, де оптимальні умови акумуляції гумусових сполук у ґрунтового профілі були ідентифіковані за поєднання низького значення показника C/N на фоні ґрунтового профілю з високим потенціалом ґрунтовою родючості, або, як допустима альтернатива, за високого показника C/N на фоні низького потенціалу родючості ґрунтів (Zhou et al., 2020). За збереження такого співвідношення спостерігається процес активної іммобілізації продуктів розкладу рослинної та кореневої органіки, створюються умови для нейтральної реакції ґрунтового розчину (Silva et al., 2008) та формування динаміки домінування процесів акумуляції над процесами розпаду. Ці висновки позитивно корелюють з динамікою формування окреслених показників за сидерального використання редьки олійної, що підтверджує її потенціал не лише для загального гумусонакопичення, але й для оптимізації гумусових структур у ґрунтового профілі у тривалій динаміці. Це позитивно виділяє редьку олійну як рослину з високим адаптивним сидеральним потенціалом, що було підтверджено й показником співвідношення гумінових та фульвокислот, який по своїй суті є індикатором фундаментальних процесів акумуляції органічного вуглецю та його потенціалу з позиції реалізації в рівнях урожайності культур і гарантування стійкості ґрунту до деградації фізичного й агрохімічного характеру (Kucserik et al., 2024). Уважається (Zhang et al., 2025), що для ґрунтів із вищим потенціалом родючості дане співвідношення має бути вищим за 1,5, будь-яке підвищення даного показника за використання агротехнологічних рішень є доцільним. З огляду на багаторічний приріст даного співвідношення за використання редьки олійної на

рівні 0,39, доведено цінність редьки олійної як поліпшувача ґрунтових властивостей для ґрунтів із середнім потенціалом природної родючості.

Зазначимо, що різними дослідженнями з питань різновидової сидерації доведено ефективність використання сидеральної маси для поліпшення балансу макро- і мікроелементів із приростом на рівні від 3,5 до 45% залежно від елементу живлення та ґрунтово-кліматичних умов (Hansen et al., 2021; Yadav et al., 2021; Choudhary et al., 2023). Такі узагальнення підтверджено й нашими оцінками як з позиції цінності сидеральної біомаси редьки олійної за біохімічним складом (Tsytsiura, 2024a), так і з позиції цінних середніх темпів іммобілізації основних компонентів ґрунтового живлення завдяки прирістним значенням зростання вмісту основних макроелементів у ґрунтового профілі на рівні 23–30%.

Різними дослідженнями підтверджено оптимізуючий вплив сидератів на агрофізичні та похідні від них водні властивості як через поліпшення гумусованості профілю, отже, і його агрегатованості, структурності та гідрофобних властивостей щодо росту частки водостійких агрегатів (Abiven et al., 2008; Liu et al., 2020; Edlinger et al., 2023), так і з позиції зростання структурної пористості ґрунту, зокрема й завдяки ґрунтовому розкладу сидеральної маси й активної оструктуровувальної діяльності їхніх корневих систем (Razanov et al., 2021; Dai et al., 2023; Krishnan & Sivakumar, 2024; Park & Lee, 2025). Ці позитиви підтверджено й нашими оцінками, позитивною прирістною динамікою основних агрофізичних параметрів сірого лісового ґрунту в товщі 0–30 см за сидерального застосування редьки олійної під сільськогосподарські культури, різноспрямованого характеру впливу на агрофізику ґрунту.

Позитивні зрушення в агрофізичних параметрах ґрунтового профілю завдяки сидерації здебільшого оптимізують водоутримувальну здатність ґрунту та поліпшують такі гідрологічні константи, як: вологість в'янення, найменша вологоємність та рівень гігроскопічного зволоження, у результаті чого підсумку, завдяки саме сидеральному використанню щонайменше на 5–8% (Clark, 2008; Deus et al., 2022).

Відмічено також, що ефективна й правильно сформована технологія сидерації може забезпечити загальне підвищення індексу якості ґрунтів в інтегральній багато-

річний оцінці до варіанту без її застосування з індексом зростання в інтервалі від 1,15 до 2,00 залежно від виду сидерату та ґрунтово-кліматичних ресурсів території (Amacher & Perry, 2007; Askari & Holden, 2015; Deus et al., 2022; Chaudhry et al., 2024). З огляду на отриманий індекс приросту у представлених дослідженнях на рівні, близькому до 1,5, редька олійна може бути рекомендована як надійний і ефективний компонент сидеральної ґрунтореабілітації деградованих земель для зон із достатнім і нестійким зволоженням.

Висновки

Доведено агротехнологічну ефективність систематичної сидерації проміжного літнього строку в системі класичних сівозмін на сірих лісових ґрунтах в умовах нестійкого зволоження, що узгоджується з таким позитивними темпами поліпшення комплексу агрофізичних, агрохімічних і гідрологічних властивостей сірого лісового ґрунту за 12-тирічний цикл досліджень, як: вміст гумусу – +0,0024%/рік, щіль-

ність ґрунту – -0,017 г/см³ на рік, щільність складення ґрунту – -0,14 г/см³ на рік, твердість ґрунту – -0,296 кг/см², загальна пористість – +0,570%/рік, капілярна пористість – +0,252%/рік, некапілярна пористість – +0,319%/рік, пористість аерації ґрунту – +0,393%/рік, водоутримувальна здатність – + 0,422%/рік, рН – +0,021 на рік, органічний вуглець – +0,0024%/рік, загальний азот – +0,001%/рік, співвідношення С/Н – 0,008 на рік, легкогідролізований азот – +0,897 мг/кг на рік, рухомий фосфор – +1,092 мг/кг на рік, обмінний калій – +1,242 мг/кг на рік.

Отже, систематичне сидеральне використання редьки олійної за проміжного (літнього) строку на сірих лісових ґрунтах в інтегральній оцінці дозволяє істотно поліпшити якість ґрунту за міжнародним показником оцінки ґрунтових ресурсів SQI та сприяє процесам ґрунтореабілітації з індексним зростанням за 12-тирічний цикл періодичного застосування на рівні до 1,5.

Список використаної літератури

- ДСТУ 4115-2002. Ґрунти. Визначення рухомих сполук фосфору та калію модифікованим методом Чирикова (Національний стандарт України). Київ : Державне видавництво стандартів України, 2003. 6 с.
- ДСТУ 4289:2004. Якість ґрунтів. Методи визначення органічної речовини (Національний стандарт України). Київ : Держспоживстандарт України, 2005. 8 с.
- ДСТУ 4362:2004. Якість ґрунтів. Показники родючості ґрунтів (Національний стандарт України). Київ : Держспоживстандарт України, 2005. 33 с.
- ДСТУ 4730:2007. Якість ґрунту. Визначення гранулометричного складу методом піпетки (модифікований Н.А. Качинським). Офіційне видання. Київ : Державний комітет з технічного регулювання та споживчої політики України, 2007. 17 с.
- ДСТУ 7828:2015. Якість ґрунтів. Визначення групового та фракційного складу гумусу методом Турина в модифікації Пономарьової та Плотнікової. (Національний стандарт України). Київ : Державна служба стандартизації та споживачтва України, , 2016. III. Набуває чинності з 01.07.2016. 11 с.
- ДСТУ 7863:2015. Якість ґрунту. Визначення легкогідролізованого азоту методом Корнфілда. (Національний стандарт України). Київ : Державна служба стандартизації та захисту прав споживачів України, 2016. 9 с.
- ДСТУ ISO 11277:2005. Якість ґрунту. Визначення розподілу частинок за розмірами в мінеральній частині ґрунту. Метод просіювання та осадження (ISO 11277:1998, IDT). Київ : Державне видавництво стандартів України, 2005. 32 с.
- Abdulraheem M.I., Tobe O.K. Green manure for agricultural sustainability and improvement of soil fertility. *Farming & Management*. 2022. Vol. 7. P. 1–8. <https://doi.org/10.31830/2456-8724.2022.FM-101>
- Abiven S., Menasseri-Aubry S., Angers D., Leterme P. A model to predict soil aggregate stability dynamics following organic residue incorporation under field conditions. *Soil Science Society of America Journal*. 2008. Vol. 72. № 1. P. 119–125. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0018>
- Amacher M.C., Perry C.H. Soil vital signs: a new soil quality index (SQI) for assessing forest soil health. Res. Pap. RMRS-RP-65WWW. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2007. 12 p.
- Ansari M.A., Choudhury B.U., Layek J., Das A., Lal R., Mishra V.K. Green manuring and crop residue management: Effect on soil organic carbon stock, aggregation, and system productivity in

the foothills of Eastern Himalaya (India). *Soil Tillage Research*. 2022. Vol. 218. P. 105318. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105318>

AOAC. Method 900.02, 934.01, 954.02, 955.04, 960.05. Official Methods of Analysis of AOAC International. 16th Edition, AOAC International, Virginia. 1995. 747 p.

Askari M.S., Holden N.M. Quantitative soil quality indexing of temperate arable management systems. *Soil and Tillage Research*. 2015. Vol. 150. P. 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.01.010>

ASTM-D854. Standard Test for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM. 2010. 19 p.

Borek Ł. The use of different indicators to evaluate chernozems fluvisols physical quality in the Odra River valley: a case study. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2019. Vol. 28. № 6. P. 4109–4116.

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

Carter M.R., Gregorich E.G. Soil sampling and methods of analysis. 2nd edition. Edited by MR Carter and EG Gregorich. Canadian Society of Soil Science. Taylor and Francis, 2008. 1264 p.

Chaudhry H., Vasava H.B., Chen S., Saurette D., Beri A., Gillespie A., Biswas A. Evaluating the Soil Quality Index Using Three Methods to Assess Soil Fertility. *Sensors (Basel)*. 2024. Vol. 24. № 3. P. 864. <https://doi.org/10.3390/s24030864>

Choudhary M., Sinha N.K., Mohanty M., Jayaraman S., Kumari N., Jyoti B., Srivastava A., Thakur J.K., Kumar N., Jha P. Response of Contrasting Nutrient Management Regimes on Soil Aggregation, Aggregate-Associated Carbon and Macronutrients in a 43-Year Long-Term Experiment. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. P. 2679. <https://doi.org/10.3390/su15032679>

Clark A. Managing cover crops profitably. DIANE Publishing. 3rd ed. 2008. 248 p.

Composts & Fertilisers. 2023. NPK Nutritional Values of Animal Manures & Compost Etc. [Електронний ресурс]. URL: https://www.allotment-garden.org/composts-fertilisers/npk-nutritional-values-animal-manures-compost/#google_vignette (дата звернення 14.10.2025).

Creamer N.G., Baldwin K.R. Summer Cover Crops. HIL-37. Department of Horticultural Science, Raleigh, NC, 1997. 57 p.

Dai W., Feng G., Huang Y., Adeli A., Jenkins J. N. Influence of cover crops on soil aggregate stability, size distribution and related factors in a no-till field. *Soil & Tillage Research*. 2024. Vol. 244. P. 106197. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106197>

Das K., Biswakarma N., Zhiipao R., Kumar A., Ghasal P.C. Pooniya V. Significance and Management of Green Manures. *Soil Health / B. Giri, A. Varma (eds.). Soil Biology*. 2020. Vol. 59. P. 197–217. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44364-1_12

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*. 2008. P. 1726.

Deus T.R.V. de, Giongo V., Salviano A.M., Santana M. da S., Silva V.C., da Santos T.C. dos Selection of green manures to provide ecosystem services in a semi-arid environment. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*. 2022. Vol. 57. № 3. P. 409–421. <https://doi.org/10.5327/Z2176-94781268>

Dey D., Nath D. Assessment of change in soil properties, nutrient availability and yield of paddy as influenced by cultivation of green manuring crop. *Asian Journal of Soil Science*. 2015. Vol. 10. № 1. P. 158–161. <https://doi.org/10.15740/HAS/AJSS/10.1/158-161>

Dobriyal P., Qureshi A., Badola R., Hussain S.A. A Review of the Methods Available for Estimating Soil Moisture and Its Implications for Water Resource Management. *Journal of Hydrology*. 2012. Vol. 458. P. 110–117. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.021>

Edlinger A., Garland G., Banerjee S., Degrun F., García-Palacios P., Herzog C., Pescador D.S., Romdhane S., Ryo M., Saghai A., Hallin S., Maestre F.T., Philippot L., Rillig M.C., van der Heijden M.G.A. The impact of agricultural management on soil aggregation and carbon storage is regulated by climatic thresholds across a 3000 km European gradient. *Global Change Biology*. 2023. Vol. 9. № 11. P. 3177–3192. <https://doi.org/10.1111/gcb.16677>

Florentin M.A., Peñalva M., Calejari A., Translated R.D., McDonald M.J. Green Manure/Cover Crops and Crop Rotation in Conservation Agriculture on Small Farms. *Integrated Crop Management*. 12. 2010. 89 p.

- Gould S. A guide to soil moisture. 2024. [Електронний ресурс]. URL: <https://connectedcrops.ca/the-ultimate-guide-to-soil-moisture/> (дата звернення 14.10.2025).
- Hansen V., Eriksen J., Jensen L.S., Thorup-Kristensen K., Magid J. Towards integrated cover crop management: N, P and S release from aboveground and belowground residues. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2021. P. 313. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107392>
- Iheshiulo E.M.-A., Larney F.J., Hernandez-Ramirez G., St Luce M., Chau H.W., Liu K. Quantitative evaluation of soil health based on a minimum dataset under various short-term crop rotations on the Canadian prairies. *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 935. P. 173335. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173335>
- Indoria A.K., Sharma K.L., Srinivas K., Lal M., Prasad J.V.N.S., Gopinath K.A., Sharma S.K., Pratibha G., Kundu S., Singh V.K., Rao K.V. Effect of Long-Term Application of Different Organic Resources on Soil Properties and Soil Quality Index of an Aridisol Under Mustard System. *Acta Scientific Agriculture*. 2025. Vol. 9.2. P. 04–13. <https://doi.org/10.31080/ASAG.2025.09.1455>
- 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. <https://doi.org/10.18805/IJARE.AF-696>
- Krishnan R., Sivakumar V L. The Effect of Soil-Structure Interaction (SSI) on Structural Stability and Sustainability of RC Structures. *Civil and Environmental Engineering Reports*. 2024. Vol. 34. № 1. P. 116–136. <https://doi.org/10.59440/ceer/184254>
- Kucerik J., Brtnicky M., Mustafa A., Hammerschmidt T., Kintl A., Sobotkova J., Alamri S., Baltazar T., Latal O., Naveed M., Malicek O., Holatko J. Utilization of Diversified Cover Crops as Green Manure-Enhanced Soil Organic Carbon, Nutrient Transformation, Microbial Activity, and Maize Growth. *Agronomy*. 2024. Vol. 14. № 9. P. 2001. <https://doi.org/10.3390/agronomy14092001>
- Lei B., Wang J., Yao H. Ecological and environmental benefits of planting green manure in paddy fields. *Agriculture*. 2022. Vol. 12. № 2. P. 223. <https://doi.org/10.3390/agriculture12020223>
- Li W.G., Yang X.X., Huang C.G., Xue N.W., Xia Q., Liu X.L., Zhang X.Q., Yang S., Yang Z.P., Gao Z.Q. Effects of rapeseed green manure on soil fertility and bacterial community in dryland wheat field. *Agricultural Sciences in China*. 2019. Vol. 52. P. 2664–2677.
- Lim J.E., Lee S.S., Jeong S.H., Lee B.M., Lee Y.H., Choi Y.B., Ok Y.S. Effects of green manure incorporation method on soil physicochemical properties. *Journal of agricultural, life and environmental sciences*. 2012. Vol. 24. P. 1–7.
- Liu X.H., Zhou X., Deng L.C., Fan L.Y., Qu L., Li M. Decomposition characteristics of rapeseed green manure and effect of nutrient release on soil fertility. *Hunan Agricultural Science*. 2020. Vol. 416. P. 39–44.
- Naz A., Rebi A., Naz R., Akbar M. U., Aslam A., Kalsom A., Niaz A., Ahmad M. I., Nawaz S., Kausar R., Ali B., Saleem M. H., Zhou J. Impact of Green Manuring on Health of Low Fertility Calcareous Soils. *Land*. 2023. Vol. 12. № 3. P. 546. <https://doi.org/10.3390/land12030546>
- 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. P. 108146. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108146>
- Park S., Lee J.-G. Green manure improves humification and aggregate stability in paddy soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 2025. Vol. 206. P. 109796. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2025.109796>
- Rani T.S., Umareddy R., Ramulu C., Kumar T.S. Green Manures and Green leaf manures for soil fertility improvement: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. 2021. Vol. 10. № 5. P. 190–196.
- Razanov S., Ovcharuk V., Krasnyak O., Bakhmat M., Bakhmat O. Agroecological assessment of green manures grown from winter grain harvest lost in the conditions of the right-bank Forest-steppe of Ukraine. *International Journal of Ecosystems and Ecology Science*. 2021. Vol. 11. № 4. P. 895–902. <https://doi.org/10.31407/ijeess11.429>
- 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. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162008000300010>
- Singh D., Devi K.B., Ashoka P., Bahadur R., Kumar N., Devi O.R., Shahni Y.S. Green Manure: Aspects and its Role in Sustainable Agriculture. *International Journal of Environment and Climate Change*. 2023. Vol. 13. № 11. P. 39–45. <https://doi.org/10.9734/ijec/v13i113142>

Spasić M., Vaceka O., Vejvodová K., Tejnecký V., Poláka F., Borůvka L., Drábek O. Determination of physical properties of undisturbed soil samples according to V. Novák. *MethodsX*. 2023. Vol. 10 (2023). P. 102133. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102133>

Stroud J.L., Kemp S.J., Sturrock C.J. The effect of organic matter amendments on soil surface stability in conventionally cultivated arable fields. *Soil Use and Management*. 2024. Vol. 40. P. e12985. <https://doi.org/10.1111/sum.12985>

Suon M., Tith S., Veu T., Voe P., Ngy S., Hill S., Chheang C. The Effects of Green Manure on Sustainable Agriculture Soil Conservation under Open Field Conditions. *International Journal of Environmental and Rural Development*. 2023. Vol. 14. № 1. P. 147–152. https://doi.org/10.32115/ijerd.14.1_147

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.

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*. 2024a. Vol. 25. № 7. P. 265–285. <https://doi.org/10.12911/22998993/188603>

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

Tsytsiura Y. Ecological adaptive tactics of oil radish root formation at different terms of green manure application. *Journal of Ecological Engineering*. 2025. Vol. 26. № 9. P. 420–439. <https://doi.org/10.12911/22998993/205413>

Uthappa A.R., Devakumar A.S., Das B., Mahajan G.R., Chavan S.B., Jinger D., Jha P.K., Kumar P., Kokila A., Krishnamurthy R., Mounesh N.V., Dhanush C., Ali I., Eldin S.M., Al-Ashkar I., Elshikh M.S., Fahad S. Comparative analysis of soil quality indexing techniques for various tree based land use systems in semi-arid India. *Frontiers in Forests and Global Change*. 2024. Vol. 6. P. 1322660. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1322660>

Wang H., Zhong L., Liu J., Liu X., Xue W., Liu X., Yang H., Shen Y., Li J., Sun Z. Systematic Analysis of the Effects of Different Green Manure Crop Rotations on Soil Nutrient Dynamics and Bacterial Community Structure in the Taihu Lake Region, Jiangsu. *Agriculture*. 2024. Vol. 14. № 7. P. 1017. <https://doi.org/10.3390/agriculture14071017>

Wong J. Handbook of Statistical Analysis and Data Mining Applications (Second Edition). Academic Press, 2018. 880 p.

Xu J., Si L., Zhang X., Cao K., Wang J. Various green manure-fertilizer combinations affect the soil microbial community and function in immature red soil. *Frontiers in Microbiology*. 2023. Vol. 14. P. 1255056. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1255056>

Yadav D., Kumawat A., Kumar P., Kumar S., Singh D., Kumar D. Chemical Fertilization to Green Manuring: Moving towards Sustained Production. *Farm Information Bureau*. 2021. Vol. 9. № 1. P. 15–19.

Zhang J., He W., Wei Z., Chen Y., Gao W. Integrating green manure and fertilizer reduction strategies to enhance soil carbon sequestration and crop yield: evidence from a two-season pot experiment. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2025. Vol. 8. 1514409. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1514409>

Zhou M., Liu C., Wang J., Meng Q., Yuan Y., Ma X., Liu X., Zhu Y., Ding G., Zhang J., Zeng X., Du W. Soil aggregates stability and storage of soil organic carbon respond to cropping systems on Black Soils of Northeast China. *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. № 1. P. 265. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57193-1>

References

DSTU 4115-2002. (2003). Grunty. Vyznachennia rukhomykh spoluk fosforu ta kaliu modyfikovanyim metodom Chyrykova (Natsionalnyi standart Ukrainy) [Soils. Determination of mobile phosphorus and potassium compounds by the modified Chirikov method (National Standard of Ukraine)]. Kyiv: Derzhavne vydavnytstvo standartiv Ukrainy [in Ukrainian].

DSTU 4289:2004. (2005). Yakist gruntiv. Metody vyznachennia orhanichnoi rehovyny (Natsionalnyi standart Ukrainy) [Soil quality. Methods for determining organic matter (National Standard of Ukraine)]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy [in Ukrainian].

DSTU 4362:2004. (2005). Yakist gruntiv. Pokaznyky rodiuchosti gruntiv. (Natsionalnyi standart Ukrainy) [Soil quality. Soil fertility indicators. (National Standard of Ukraine)]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy. Kyiv: Derzhavnyi spozhyvchy standart Ukrainy [in Ukrainian].

DSTU 4730:2007. (2007). Yakist gruntu. Vyznachennia hranulometrychnoho skladu metodom pipetky (modyfikovanyi N.A. Kachynskym) [Soil quality. Determination of granulometric composition by the pipette method (modified by N.A. Kachinsky)]. Ofitsiine vydannia. Kyiv: Derzhavnyi komitet z tekhnichnoho rehuliuвання ta spozhyvchoi polityky Ukrainy [in Ukrainian].

DSTU 7828:2015. (2016). Yakist gruntiv. Vyznachennia hrupovoho ta fraktsiinoho skladu humusu metodom Turyna v modyfikatsii Ponomarovoї ta Plotnikovoї. (Natsionalnyi standart Ukrainy) [Soil quality. Determination of the group and fractional composition of humus using the Turin method, modified by Ponomariova and Plotnikova. (National Standard of Ukraine)]. Kyiv: Derzhavna sluzhba standartyzatsii ta spozhyvatstva Ukrainy, III. Nabuvaie chynnosti z 01.07.2016 [in Ukrainian].

DSTU 7863:2015. (2016). Yakist gruntu. Vyznachennia lehkohidrolizovanoho azotu metodom Kornfilda. (Natsionalnyi standart Ukrainy) [Soil quality. Determination of easily hydrolyzable nitrogen using the Kornfield method. (National Standard of Ukraine)]. Kyiv: Derzhavna sluzhba standartyzatsii ta zakhystu prav spozhyvachiv Ukrainy [in Ukrainian].

DSTU ISO 11277:2005. (2005). Yakist gruntu. Vyznachennia rozpodilu chastynok za rozmiramy v mineralnii chastyni gruntu. Metod prosiuvannia ta osadzhennia (ISO 11277:1998, IDT) [Soil quality. Determination of particle size distribution in the mineral part of soil. Sieving and sedimentation method (ISO 11277:1998, IDT)]. Kyiv: Derzhavne vydavnytstvo standartiv Ukrainy [in Ukrainian].

Abdulraheem, M.I., & Tobe, O.K. (2022). Green manure for agricultural sustainability and improvement of soil fertility. *Farming & Management*, 7, 1–8. <https://doi.org/10.31830/2456-8724.2022.FM-101> [in English].

Abiven, S., Menasseri-Aubry, S., Angers, D., & Leterme, P. (2008). A model to predict soil aggregate stability dynamics following organic residue incorporation under field conditions. *Soil Science Society of America Journal*, 72(1), 119–125. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0018> [in English].

Amacher, M.C., & Perry, C.H. (2007). Soil vital signs: a new soil quality index (SQI) for assessing forest soil health. Res. Pap. RMRS-RP-65WWW. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station [in English].

Ansari, M.A., Choudhury, B.U., Layek, J., Das, A., Lal, R., & Mishra, V.K. (2022). Green manuring and crop residue management: Effect on soil organic carbon stock, aggregation, and system productivity in the foothills of Eastern Himalaya (India). *Soil Tillage Research*. 218, 105318. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105318> [in English].

AOAC (1995). Method 900.02, 934.01, 954.02, 955.04, 960.05. Official Methods of Analysis of AOAC International. 16th Edition, AOAC International, Virginia [in English].

Askari. M.S., & Holden, N.M. (2015). Quantitative soil quality indexing of temperate arable management systems. *Soil and Tillage Research*, 150, 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.01.010> [in English].

ASTM-D854 (2010). Standard Test for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM [in English].

Borek, Ł. (2019). The use of different indicators to evaluate chernozems fluvisols physical quality in the Odra River valley: a case study. *Polish Journal of Environmental Studies*, 28(6), 4109–4116 [in English].

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

Carter, M.R., & Gregorich, E.G. (2008). Soil sampling and methods of analysis. 2nd edition. Edited by MR Carter and EG Gregorich. Canadian Society of Soil Science. Taylor and Francis [in English].

Chaudhry, H., Vasava, H.B., Chen, S., Saurette, D., Beri, A., Gillespie, A., & Biswas, A. (2024). Evaluating the Soil Quality Index Using Three Methods to Assess Soil Fertility. *Sensors (Basel)*, 24(3), 864. <https://doi.org/10.3390/s24030864> [in English].

Choudhary, M., Sinha, N.K., Mohanty, M., Jayaraman, S., Kumari, N., Jyoti, B., Srivastava, A., Thakur, J.K., Kumar, N., & Jha, P. (2023). Response of Contrasting Nutrient Management Regimes on Soil Aggregation, Aggregate-Associated Carbon and Macronutrients in a 43-Year Long-Term Experiment. *Sustainability*, 15, 2679. <https://doi.org/10.3390/su15032679> [in English].

- Clark, A. (2008). Managing cover crops profitably. DIANE Publishing (3rd ed.) [in English].
- Composts & Fertilisers. (2023). NPK Nutritional Values of Animal Manures & Compost Etc. [Electronic resource] URL: https://www.allotment-garden.org/composts-fertilisers/npk-nutritional-values-animal-manures-compost/#google_vignette (access date 14.10.2025) [in English].
- Creamer, N.G., & Baldwin, K.R. (1997). Summer Cover Crops. HIL-37. Department of Horticultural Science, Raleigh, NC [in English].
- Dai, W., Feng, G., Huang, Y., Adeli, A., & Jenkins, J.N. (2024). Influence of cover crops on soil aggregate stability, size distribution and related factors in a no-till field. *Soil & Tillage Research*, 244, 106197. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106197> [in English].
- Das, K., Biswakarma, N., Zhiipao, R., Kumar, A., Ghasal, P.C., & Pooniya, V. (2020). Significance and Management of Green Manures. In: Giri, B., Varma, A. (eds) *Soil Health. Soil Biology*, 59, 197–217. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44364-1_12 [in English].
- De Willigen, 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 [in English].
- Deus, T.R.V. de, Giongo, V., Salviano, A. M., Santana, M. da S., Silva, V.C., & da Santos, T.C. dos (2022). Selection of green manures to provide ecosystem services in a semi-arid environment. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, 57(3), 409–421. <https://doi.org/10.5327/Z2176-94781268> [in English].
- Dey, D., & Nath, D. (2015). Assessment of change in soil properties, nutrient availability and yield of paddy as influenced by cultivation of green manuring crop. *Asian Journal of Soil Science*, 10(1), 158–161. <https://doi.org/10.15740/HAS/AJSS/10.1/158-161> [in English].
- Dobriyal, P., Qureshi, A., Badola, R., & Hussain, S.A. (2012). A Review of the Methods Available for Estimating Soil Moisture and Its Implications for Water Resource Management. *Journal of Hydrology*, 458, 110–117. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.021> [in English].
- Edlinger, A., Garland, G., Banerjee, S., Degrun, F., García-Palacios, P., Herzog, C., Pescador, D.S., Romdhane, S., Ryo, M., Saghai, A., Hallin, S., Maestre, F.T., Philippot, L., Rillig, M.C., & van der Heijden, M.G.A. (2023). The impact of agricultural management on soil aggregation and carbon storage is regulated by climatic thresholds across a 3000 km European gradient. *Global Change Biology*, 9(11), 3177–3192. <https://doi.org/10.1111/gcb.16677> [in English].
- Florentin, M.A., Peñalva, M., Calegari, A., Translated, R.D., & McDonald, M.J. (2010). Green Manure/Cover Crops and Crop Rotation in Conservation Agriculture on Small Farms. *Integrated Crop Management: Rome, Italy* 12 [in English].
- Gould, S. (2024). A guide to soil moisture. [Electronic resource] URL: <https://connectedcrops.ca/the-ultimate-guide-to-soil-moisture/> (access date 14.10.2025) [in English].
- Hansen, V., Eriksen, J., Jensen, L.S., Thorup-Kristensen, K., & Magid, J. (2021). Towards integrated cover crop management: N, P and S release from aboveground and belowground residues. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 313. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107392> [in English].
- Iheshiulo, E.M.-A., Larney, F.J., Hernandez-Ramirez, G., St Luce, M., Chau, H.W., & Liu, K. (2024). Quantitative evaluation of soil health based on a minimum dataset under various short-term crop rotations on the Canadian prairies. *Science of the Total Environment*, 935, 173335. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173335> [in English].
- Indoria, A.K., Sharma, K.L., Srinivas, K., Lal, M., Prasad, J.V.N.S., Gopinath, K.A., Sharma, S.K., Pratibha, G., Kundu, S., Singh, V.K., & Rao, K.V. (2025). Effect of Long-Term Application of Different Organic Resources on Soil Properties and Soil Quality Index of an Aridisol Under Mustard System. *Acta Scientific Agriculture*, 9.2, 04–13. <https://doi.org/10.31080/ASAG.2025.09.1455> [in English].
- 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. <https://doi.org/10.18805/IJARE.AF-696> [in English].
- Krishnan, R., & Sivakumar, V.L. (2024). The Effect of Soil-Structure Interaction (SSI) on Structural Stability and Sustainability of RC Structures. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 34(1), 116–136. <https://doi.org/10.59440/ceer/184254> [in English].
- Kucerik, J., Brtnicky, M., Mustafa, A., Hammerschmidt, T., Kintl, A., Sobotkova, J., Alamri, S., Baltazar, T., Latal, O., Naveed, M., Malicek, O., & Holatko, J. (2024). Utilization of Diversified Cover Crops as Green Manure-Enhanced Soil Organic Carbon, Nutrient Transformation, Microbial Activity, and Maize Growth. *Agronomy*, 14(9), 2001. <https://doi.org/10.3390/agronomy14092001> [in English].

- Lei, B., Wang, J., & Yao, H. (2022). Ecological and environmental benefits of planting green manure in paddy fields. *Agriculture*, 12(2), 223. <https://doi.org/10.3390/agriculture12020223> [in English].
- Li, W.G., Yang, X.X., Huang, C.G., Xue, N.W., Xia, Q., Liu, X.L., Zhang, X.Q., Yang, S., Yang, Z.P., & Gao, Z.Q. (2019). Effects of rapeseed green manure on soil fertility and bacterial community in dryland wheat field. *Agricultural Sciences in China*, 52, 2664–2677 [in English].
- Lim, J.E., Lee, S.S., Jeong, S.H., Lee, B.M., Lee, Y.H., Choi, Y.B., & Ok, Y.S. (2012). Effects of green manure incorporation method on soil physicochemical properties. *Journal of agricultural, life and environmental sciences*, 24, 1–7 [in English].
- Liu, X.H., Zhou, X., Deng, L.C., Fan, L.Y., Qu, L., & Li, M. (2020). Decomposition characteristics of rapeseed green manure and effect of nutrient release on soil fertility. *Hunan Agricultural Science*, 416, 39–44 [in English].
- Naz, A., Rebi, A., Naz, R., Akbar, M. U., Aslam, A., Kalsom, A., Niaz, A., Ahmad, M.I., Nawaz, S., Kausar, R., Ali, B., Saleem, M.H., & Zhou, J. (2023). Impact of Green Manuring on Health of Low Fertility Calcareous Soils. *Land*, 12(3), 546. <https://doi.org/10.3390/land12030546> [in English].
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108146> [in English].
- Park, S., & Lee, J.-G. (2025). Green manure improves humification and aggregate stability in paddy soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 206, 109796. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2025.109796> [in English].
- Rani, T.S., Umareddy, R., Ramulu, C., & Kumar, T.S. (2021). Green Manures and Green leaf manures for soil fertility improvement: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 10(5), 190–196 [in English].
- Razanov, S., Ovcharuk, V., Krasnyak, O., Bakhmat, M., & Bakhmat, O. (2021). Agroecological assessment of green manures grown from winter grain harvest lost in the conditions of the right-bank Forest-steppe of Ukraine. *International Journal of Ecosystems and Ecology Science*, 11(4), 895–902. <https://doi.org/10.31407/ijees11.429> [in English].
- 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. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162008000300010> [in English].
- Singh, D., Devi, K.B., Ashoka, P., Bahadur, R., Kumar, N., Devi, O.R., & Shahni, Y.S. (2023). Green Manure: Aspects and its Role in Sustainable Agriculture. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(11), 39–45. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i113142> [in English].
- Spasić, M., Vaceka, O., Vejvodová, K., Tejnecký, V., Poláka, F., Borůvka, L., & Drábek, O. (2023). Determination of physical properties of undisturbed soil samples according to V. Novák. *MethodsX*, 10, 102133. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102133> [in English].
- Stroud, J.L., Kemp, S.J., & Sturrock, C.J. (2024). The effect of organic matter amendments on soil surface stability in conventionally cultivated arable fields. *Soil Use and Management*, 40, e12985. <https://doi.org/10.1111/sum.12985> [in English].
- Suon, M., Tith, S., Veu, T., Voe, P., Ngy, S., Hill, S., & Chheang, C. (2023). The Effects of Green Manure on Sustainable Agriculture Soil Conservation under Open Field Conditions. *International Journal of Environmental and Rural Development*, 14(1), 147–152. https://doi.org/10.32115/ijerd.14.1_147 [in English].
- 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 [in English].
- Tsytsiura, Y. (2024a). 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].
- Tsytsiura, Y. (2024b). 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. (2025). Ecological adaptive tactics of oil radish root formation at different terms of green manure application. *Journal of Ecological Engineering*, 26(9), 420–439. <https://doi.org/10.12911/22998993/205413> [in English].

Uthappa, A.R., Devakumar, A.S., Das, B., Mahajan, G.R., Chavan, S.B., Jinger, D., Jha, P.K., Kumar, P., Kokila, A., Krishnamurthy, R., Mounesh, N.V., Dhanush, C., Ali, I., Eldin, S.M., Al-Ashkar, I., Elshikh, M.S., & Fahad, S. (2024). Comparative analysis of soil quality indexing techniques for various tree based land use systems in semi-arid India. *Frontiers in Forests and Global Change*, 6, 1322660. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1322660> [in English].

Wang, H., Zhong, L., Liu, J., Liu, X., Xue, W., Liu, X., Yang, H., Shen, Y., Li, J., & Sun, Z. (2024). Systematic Analysis of the Effects of Different Green Manure Crop Rotations on Soil Nutrient Dynamics and Bacterial Community Structure in the Taihu Lake Region, Jiangsu. *Agriculture*, 14(7), 1017. <https://doi.org/10.3390/agriculture14071017> [in English].

Wong, J. (2018). *Handbook of Statistical Analysis and Data Mining Applications* (Second Edition). Academic Press [in English].

Xu, J., Si, L., Zhang, X., Cao, K., & Wang, J. (2023). Various green manure-fertilizer combinations affect the soil microbial community and function in immature red soil. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1255056. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1255056> [in English].

Yadav, D., Kumawat, A., Kumar, P., Kumar, S., Singh, D., & Kumar, D. (2021). Chemical Fertilization to Green Manuring: Moving towards Sustained Production. *Farm Information Bureau*, 9(1), 15–19 [in English].

Zhang, J., He, W., Wei, Z., Chen, Y., & Gao, W. (2025). Integrating green manure and fertilizer reduction strategies to enhance soil carbon sequestration and crop yield: evidence from a two-season pot experiment. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8, 1514409. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1514409> [in English].

Zhou, M., Liu, C., Wang, J., Meng, Q., Yuan, Y., Ma, X., Liu, X., Zhu, Y., Ding, G., Zhang, J., Zeng, X., & Du, W. (2020). Soil aggregates stability and storage of soil organic carbon respond to cropping systems on Black Soils of Northeast China. *Scientific Reports*, 10(1), 265. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57193-1> [in English].

Отримано: 20.10.2025

Прийнято: 18.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

