

УДК 635.15:631.5

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.145.2.18>

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СИДЕРАЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ РЕДЬКИ ОЛІЙНОЇ ЗА КРИТЕРІЄМ ЯКОСТІ ҐРУНТУ В МАСИВІ АГРОФІЗИЧНИХ ТА ГІДРОФІЗИЧНИХ ЙОГО ПАРАМЕТРІВ

Цицюра Я.Г. — к.с.-г.н., доцент,

доцент кафедри землеробства, ґрунтознавства та агрохімії,

Вінницький національний аграрний університет

orcid.org/0000-0002-9167-833X

Світові ризики зумовлені інтенсивною деградацією ґрунтового покриву зумовили пошук шляхів до реабілітації та збереження ґрунтів за рахунок інноваційних рішень у сферах систем обробітку ґрунту, удобрення та застосування інших альтернатив.

Одним із напрямків вказаних інновацій є перехід на біоорганічні варіанти удобрення основних сільськогосподарських культур як за рахунок застосування лінійки препаратів біоорганічного походження, так і за рахунок переходу на сидеральні системи удобрення, які по своїй суті є моделлю природніх процесів колообігу поживних речовин та біомаси в агроценозах.

Проте сидерація має і ряд застережень, які ґрунтуються на гідротермічних умовах їх росту і формування сидеральної біомаси, а також на послідовій інтенсивності її розкладення та іммобілізації. Крім того, важливим аспектом є підбір відповідних видів сидератів адаптованих для відповідного типу ґрунту та сільськогосподарських територій. З цієї позиції актуальним є тривале вивчення певних видів рослин на можливість їх високо-ефективного застосування в якості сидератів за умов різнострокового використання.

У статті наведено результати тривалого вивчення (2014–2025 рр.) перспективної сидеральної культури для умов Лісостепової зони редьки олійної (сорт Журавка).

Для досліджень було використано широке коло методик та польових оцінок відповідно до апробованих європейських практик та досвіду різних науковців у цій сфері.

Встановлено, що систематичне застосування редьки олійної у варіанті проміжного (літнього) строку вирощування дозволяє істотно поліпшити агрофізичні та окремі гідрофізичні властивості сірих лісових ґрунтів, зокрема за такими параметрами як щільність та твердість ґрунтів, різні види пористості, водоутримуюча здатність та рівень найменшої вологоємності.

У інтегральному вимірі через показник індексу якості ґрунту досягнуто його підвищення майже в 1,5 рази у співставленні до вихідного показника на початку закладення дослідів. За повний цикл досліджень досягнуто середній для шару ґрунту 0–30 см показник індексу якості ґрунту на рівні 0,690, що відповідає категорії «добре» за міжнародними параметрами ідентифікації ґрунтового покриву на протизвагу вихідному показнику у значенні 0,453 для того ж інтервалу глибини ґрунтового профілю, який відноситься до категорії «задовільно».

Ключові слова: сидеральна біопродуктивність, якість ґрунту, аналіз головних компонент, ґрунтополіпшення, агрофізичні властивості ґрунту.

Tsytsiura Ya. G. Evaluation of the effectiveness of oil radish green manure application based on soil quality criteria within the framework of its agrophysical and hydrophysical parameters

Global risks driven by intensive soil cover degradation have necessitated the search for pathways to soil rehabilitation and conservation through innovative solutions in tillage systems, fertilization, and alternative practices.

One direction of such innovations is the transition to bio-organic fertilization of major crops, both through the application of bio-organic preparations and the use of green manure systems, which essentially model the natural processes of nutrient and biomass cycling within agroecosystems.

However, green manuring also carries certain constraints, which are determined by the hydrothermal conditions of crop growth and biomass formation, as well as by the subsequent

intensity of decomposition and immobilization. Furthermore, an important aspect is the selection of appropriate green manure species adapted to specific soil types and agricultural landscapes. From this perspective, long-term evaluation of certain plant species is highly relevant to assess their potential for effective application as green manure crops under various growing periods.

*This article presents the results of long-term research (2014–2025) on a promising green manure crop for the Forest-Steppe zone—oil radish (*Raphanus sativus* var. *oleiformis*, cv. *Zhuravka*).*

A wide range of methodologies and field assessments were applied, following approved European practices and the experience of various researchers in this field.

It was established that systematic application of oil radish as an intermediate (summer) green manure crop significantly improved the agrophysical and certain hydrophysical properties of gray forest soils, particularly in terms of soil bulk density and penetration resistance, different types of porosity, water-holding capacity, and the level of field capacity.

In an integrated assessment through the Soil Quality Index (SQI), an increase of almost 1.5 times was achieved compared with the baseline at the start of the experiment. Over the full research cycle, the average SQI for the 0–30 cm soil layer reached 0.690, which corresponds to the “good” category according to international soil quality identification parameters, in contrast to the initial value of 0.453 for the same depth interval, classified as “satisfactory.”

Key words: green manure biomass productivity, soil quality, principal component analysis, soil improvement, soil agrophysical properties.

Постановка проблеми. Проблема агрофізичної деградації ґрунтового покриву є актуальною проблемою у світовому вимірі. Більшість ґрунтів за сучасного рівня інтенсивного використання перебувають у динамічному стані зміни щільності, різних видів пористості та структурно-агрегатного стану [1, с. 2–3; 2, с. 345–346]. Ця динаміка у більшості випадків має негативну тенденцію від оптимального рівня та створює перешкоди до реалізації урожайного потенціалу сучасних сортів та гібридів сільськогосподарських культур, тобто реальну загрозу продовольчій безпеці територій [3, с. 727].

Сучасна наука розробила ряд конкретних заходів щодо вирішення питань оптимізації агрофізичного стану ґрунтового покриву. У першу чергу це зміна парадигми системи обробітку ґрунту та удобрення [4, с. 119–12]. Що стосується системи удобрення то чітко прослідковується тактика повернення до органо-мінеральних або ж органічних систем удобрення де поряд із швидкодією мінеральних добрив створюються оптимальні передумови для гумосонакопичення та стабілізації ґрунтового живлення та мікробіологічного потенціалу ґрунту за рахунок внесення органічної біомаси, що у підсумку створює стійкі процеси до запобігання дегуміфікації ґрунтів, а, отже і збереження ґрунтової структури та відповідних рівнів водостійкості ґрунту [5, с. 47–48; 6, с. 1–2; 7, с. 2; 8, с. 68; 9, с. 1529–1530; 10, с. 2].

У концепції біоорганічних систем удобрення сидерація займає важливе і перспективне значення за рахунок не лише як потужний замітник мінеральних систем удобрення, але й як технологія, що максимально імітує природний процес колообігу органіки в агроєкосистемах, що створює передумови повернення до точок оптимальності основних агрофізичних параметрів ґрунтового профілю, стійких до послідовних змін за повернення до мінеральних систем удобрення [11, с. 187–188; 12, с. 1–2].

Разом із тим сидерація має ряд обмежуюючих чинників як з позиції гідротермічних умов відповідних територій, так і з позиції добору відповідних видів рослин, які б максимально гарантують досягнення оптимальних цілей сидерації, до яких відносять: рівень сидеральної біопродуктивності, адаптивність

до проміжного сидерального використання, біохімічний склад сформованої сидеральної маси та динамізм процесів її мінералізації у ґрунтовому профілі [13, с. 122–123; 14, с. 10–15; 15, с. 299; 16, с. 385; 17, с. 1027–1028]. Важливим при цьому залишається супутній вплив сидерації як на поживний режим ґрунту, так і на формування комплексу агрофізичних його режимів і властивостей [18, с. 794; 19, с. 1186–1187; 20, с. 312–313].

З огляду на окреслені аспекти проблеми доцільним є вивчення впливу певного виду підібраного сидерального компонента на комплекс відповідних властивостей, що дозволить обґрунтувати та технологічно регламентувати відповідні варіанти одновидової чи полівидової сидерації [21, с. 1; 22, с. 2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання впливу сидератів на комплекс агрофізичних показників є базовим у дослідженні різноваріантних способів сидерації у різних ґрунтово-кліматичних зонах при застосуванні спеціально підібраних видів чи їх комбінованих сумішей [14, с. 7–9; 23, с. 191–193].

В цілому встановлено позитивний вплив на: поліпшення структурно-агрегатного складу ґрунту за зростання агрономічно цінних фракцій чи їх інтервалів [7, с. 3–5], посилення водостійкої структури ґрунтових агрегатів та пов'язаних з цим процесів протиерозійної стійкості, водопоглинальної та водоутримуючої здатності, поліпшення водних та повітряних констпнт ґрунту [24, с. 2–5; 5, с. 49–52; 10, с. 5–9], формування агрегатованості ґрунтового профілю та особливо орного шару товщиною 0–30 см [25, с. 324–325; 26, с. 23], формування передумов для подальшої оптимізації об'ємної та рівноважної щільностей [27, с. 2–3], формування загальних засад протікання структурно-агрегатних перетворень у загальний товщі ґрунтового профілю з огляду на динаміку річних температур, накопичення органіки та супутніх процесів розкладення та мінералізації вхідних компонентів у систему ґрунтослина [28, с. 4–7].

Разом із тим, оцінка ефективності сидерації має носити інтегральний характер оцінки не за одним критерієм, а за масивом показників оцінки [29, с. 181–183; 30, с. 1026–1027]. Це дозволить сформувати цілісну систему оцінки та доцільність застосування сидерації, особливо з позиції врахування чергування культур, тривалості та періодичності застосування сидерації.

З огляду на це вивчення конкретного виду рослини сидерату у взаємопов'язаній системі індикаторів ґрунтових властивостей є актуальним науково-виробничим завданням, що потребує подальшого наукового узагальнення.

Метою дослідження було вивчення ефективності застосування проміжного (літнього) варіанту сидерації у сівозміні за використання редьки олійної (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.) з огляду на інтегровані якісні показники ґрунту на основі масиву агрофізичних та структурно-агрегатних показників у рамках виконання етапів державної тематики «Розробка екологоорієнтованих технологій вирощування біоенергетичних культур для забезпечення енергонезалежності та ґрунтозбереження задля формування кліматичної нейтральності» (№ держреєстрації 0124U000483).

Матеріали та методи 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 середньобагаторічні 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 даного досліджу 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 черговою раз на два роки для запобігання фітотоксичності хрестоцвітого сидерату. Система дослідних варіантів застосована у рамках відповідного чергування культур за відсутності інших видів хрестоцвітих рослин у сівозміні. На дослідних ділянках окрім сидерату інші види добрив не застосовувались. За період 2014–2025 років схема чергування культур мала наступний вигляд: сорго зернове (після гороху) – ярий ячмінь – горох – ярий ячмінь – соя – яра пшениця – соняшник – озимий горох – нут – ярий ячмінь – кукурудза на зерно. Власне сидерація у даній сівозміні була застосована під такі культури сорго зернове (2014) – горох (2016) – соя (2018) – соняшник (2020) – нут (2022) – кукурудза на зерно (2024).

Облік основних показників згідно програми досліджень було проведено у три періоди: на початку досліджу у 2014, проміжний – у 2019 та заключний – у 2025 році весною до посіву відповідної культури.

Схема досліджень у всі роки передбачала чотирьохразову повторність з обліковою площею відбору зразків та контролю показників 25 м^2 . Як сидерат використано редьку олійну сорту Журавка з сидеральним конструюванням її ценозу (норма висіву $2,5\text{ млн}$ насінин на га з міжряддям 15 см відразу після збирання попередньої культури з проміжним комбінованим обробітком ґрунту на глибину $12\text{--}16\text{ см}$). Сидерацію редьки олійної у всі роки проводили на фазу цвітіння культури (ВВСН 64–67) із загортанням у ґрунт на глибину $14\text{--}16\text{ см}$ важкими дисковими бородами (БДН-2.4) після попереднього підкошування з подрібненням. Глибина обробітку у позасидеральний період залежала від технології вирощування відповідних культур у сівозміні і за повний період досліджень склала показник була $22,55\text{ см}$.

Фенологічний розвиток рослин було оцінено спираючись на стандартну шкалу ВВСН [31, с. 15–16]. Облік сформованої сидеральної маси було проведено методом пробних майданчиків площею 1 м^2 у 4-х разовій повторності, а показник акумульованої кореневої біомаси визначався на підставі застосування стандартних підходів деталізований в [32, с. 422–423].

Вміст сухої речовини у надземній та кореневій масі рослин визначали шляхом висушування до постійної маси при $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ та озолення при $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ [33, с. 87–89].

Переведення сформованої загальної сидеральної маси рослин редьки олійної у класичний напівперепрілий гній ВРХ було проведено на підставі тривалої супутньої біохімічної оцінки редьки олійної за різнострокового сидерального використання [30, с. 1027–1028].

Зразки ґрунту для аналізу відбирались з шарів ґрунту $0\text{--}10$, $10\text{--}20$ та $20\text{--}30\text{ см}$ в масі загальною вагою 1 кг кожний.

Об’ємна щільність ґрунту (ОЩ, г/см^3) була визначена гравіметричним методом у циліндрах Копецького як маса сухого ґрунту на об’єм. Вага цього зразка ґрунту була визначена після висушування в печі при температурі $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом приблизно $18\text{--}24$ годин [34, с. 4110]. Потім вага сухого ґрунту була розділена на об’єм зразка, щоб отримати об’ємну щільність (г/см^3).

Щільність складення (ЩС, г/см^3) ґрунту визначали стандартним лабораторним пікнометричним методом [35, с. 3–7].

Твердість ґрунту (ТГ, кг/см^2) визначали застосовуючи пенетромтр для ґрунту Walcom FM-204TR як середнє з оцінкою для п’яти визначень для кожного горизонту у кожному повторенні варіантів досліджу.

Капілярну пористість ґрунту (Π_k , %), некапілярну пористість ґрунту ($\Pi_{нк}$, %) та пористість аерації (Π_a , %) визначали стандартними лабораторно-розрахунковим методом визначення [36, с. 3–4]. Загальну пористість ґрунту (Π_s , %) визначали як суму Π_k та $\Pi_{нк}$.

Визначення водоутримуючої здатності ґрунту (ВЗ, %) як похідної константи від базових агрофізичних властивостей ґрунту було визначено відповідно до апробованої методики [37, с. 294–295]. Методика передбачала поміщення відомої ваги сухого ґрунту в перфорований контейнер, вистелений фільтрувальним папером. Повільно додавали воду, доки ґрунт не був повністю насичений (поверхня блищала, але вода не збиралася в поверхневій окремості). Давали контейнеру вільно стікати протягом 2–3 годин. Видаляли всю вільну воду (ту, що залишається в макропорах), залишаючи тільки капілярну воду. Зважували насичений ґрунт і контейнер з вологим ґрунтом. Записували масу як m_{wet} . Висушували зразок у печі при 105 °С протягом 6–8 годин (до досягнення постійної ваги). Охолоджували в ексікаторі і зважували знову. Записували суху масу як $m_{сухого}$. Показник розраховувався за рівнянням 1:

$$BZ = \frac{m_{\text{вологого}} - m_{\text{сухого}}}{m_{\text{сухого}}} \times 100 \quad (1)$$

де $m_{\text{вологого}}$ – маса насиченого (вологого) ґрунту (г); $m_{\text{сухого}}$ – маса висушеного в печі ґрунту (г).

Найменшу вологоємність ґрунту (НВГ, у % від сухої маси ґрунту) було розраховано за тим же рівнянням 1 на підставі методики деталізованої [38, с. 7–8], яка передбачала розміщення зразку ґрунту на сітчастому фільтрі над посудиною з водою для насичення зразку протягом 48 годин капілярною вологою знизу та послідуного стікання протягом 2–3 годин гравітаційної вологи. Зразок після цього зважували, висушували при +105 °С для отримання маси сухого зразка.

Показник якості ґрунту у виразі індексу якості ґрунту (ІЯГ) визначали відповідно до моделі нелінійної оцінки ваги кожного компонента масиву показників (відповідно до методу запропонованого [39, с. 2–3]) за рівнянням 2 а нормалізацію S_i за рівнянням 3:

$$ІЯГ = \sum_{i=1}^n w_i \times S_i \quad (2)$$

де: n – число параметрів, w_i – вага i -того параметру; S_i – нормалізований i -тий параметр.

$$S_i = 1 / \left[1 + \left(\frac{X}{X_0} \right)^b \right] \quad (3)$$

де X – фактичний показник; X_0 – середнє по масиву показників; b – нахил кривої апроксимації, який вважається рівним -10,5 для показника у логістичному значенні «більше – краще» та +10,5 для показника «менше – краще».

Вагу параметрів w_i було визначено на підставі аналізу головних компонент (АГК) як відношення спільності i -го показника до суми спільності всіх показників [40, с. 2–3].

Спільність факторів (Communality) визначали відповідно до [41, с. 2–3] за рівнянням 4.

$$Communality_i = l_{i1}^2 + l_{i2}^2 + \dots + l_{ik}^2 \quad (4)$$

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

Аналіз гідротермічних умов періоду проведення досліджень було проведено за показниками: середньодобова температура ($^{\circ}\text{C}$), кількість опадів (мм), відносна вологість (%), гідротермічний коефіцієнт (ГТК) (рівняння 5) та коефіцієнтом значущості відхилень (C_{sd}) (рівняння 6) (табл. 1).

$$HTC = \frac{\sum R}{0.1 \times \sum t_{>10}} \quad (5)$$

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.

$$C_{sd} = \frac{\left(X_i - X_{av} \right)}{S} \quad (6)$$

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; $(-1) \div (-2)$ 2 – суттєво відрізняються від багаторічних; > 2 (< -2) – близькі до екстремальних.

Таблиця 1

Оцінка гідротермічних умов за період досліджень (за показником ГТК),
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 ($^{\circ}\text{C}$) за період листопад попереднього року – березень наступного; ** – сума опадів (мм) за період листопад попереднього року – березень наступного.

Для кожного аналізованого фізичного параметра ґрунту визначали його середнє арифметичне, стандартне відхилення та коефіцієнт варіації у статистичному

програму забезпеченні Statistica 10 (StatSoft – Dell Software Company, США). Для порівняння різниць між середніми значеннями за варіантами було використано дисперсійний аналіз за допомогою тесту Бонферроні на статистичному рівні $p < 0,05$ та $p < 0,01$. Отримані дані було проаналізовано за використання стандартних методів дисперсійного та кореляційного аналізу.

З огляду на визначений гідротермічний оптимум для ростових і біоформуєчих процесів редьки олійної [42, с. 220–221], роки періоду досліджень можна розмістити у такому порядку зростання сприятливості для ростових процесів редьки олійної за період її сидерального застосування у досліді Враховуючи оптимальні параметри для ростових процесів рослин редьки олійної відповідно до наших попередніх багаторічних оцінок роки досліджень було розміщено у наступному порядку зростання сприятливості ростових процесів для редьки олійної: 2024–2020–2016–2018–2014–2022. З позиції оптимальності режимів розкладення сидеральної мас редьки олійної у ґрунтового профілі в підставі рекомендованих параметрів за [43, с. 2–3] роки сидерального застосування редьки олійної у досліді можна розмістити у наступному порядку за зростанням: 2024–2016–2020–2014–2018–2022.

Виклад основного матеріалу дослідження. Зведені результати сидеральної біопродуктивності рослин редьки олійної за період досліджень представлено на рис. 1.

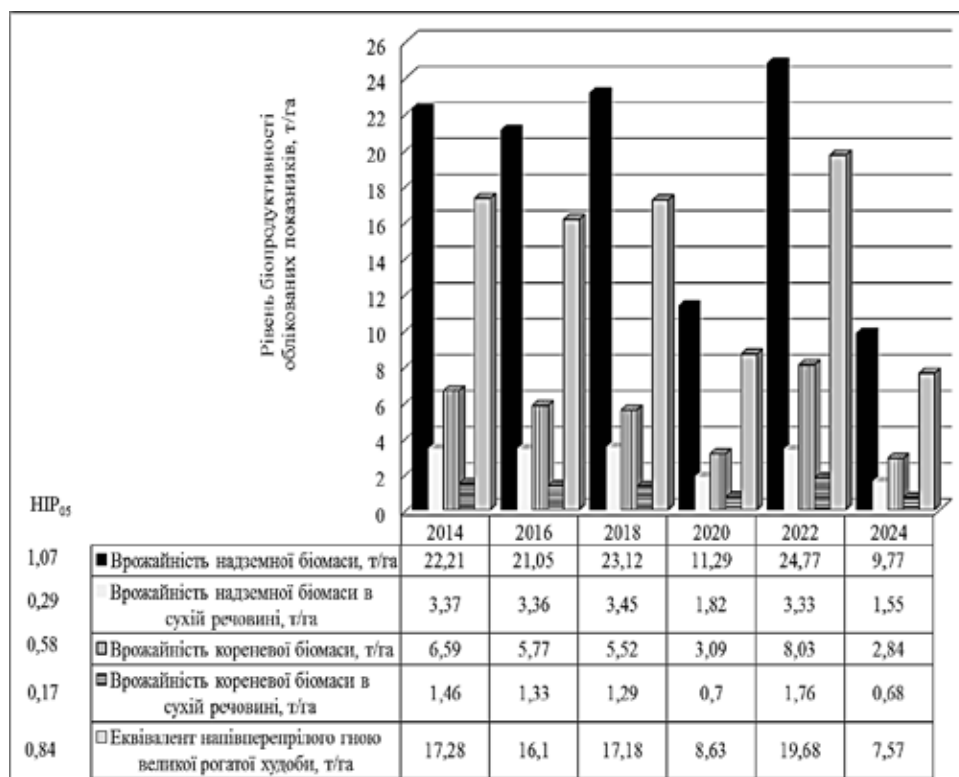


Рис. 1. Показники біопродуктивності редьки олійної за період її сидерального використання у дослідженнях, 2014–2024 рр.

За період проміжного сидерального використання редьки олійної у роки відповідно до схеми дослідів її сидеральна продуктивність у середньому була 24,01 т/га (4,02 т/га у сухій речовині) при міжрічному варіюванні 34,56 т/га. Середній коефіцієнт співвідношення між сформованою надземною масою та кореневими рештками був 3,52 у сирій біомасі та 2,34 у сухій речовині.

Встановлено середній за період 2014–2019 удобрювальний потенціал редьки олійної як сидерату в еквіваленті 16,85 т/га (у виразі напівперепрілого гною ВРХ) за аналогічного показника у значенні 11,96 т/га за період 2020–2024. Середній рівень удобрення сидеральною органікою у варіанті сидерації за період 2014–2024 був 13,10 т/га, що відповідає середньому рівневі біоорганічного удобрення [44, с. 67–69].

За результатами обліків у розрізі варіантів дослідів було встановлено результуючий вплив сидерації на формування агрофізичних та пов'язаних із ними водних властивостей ґрунту (табл. 2).

Таблиця 2

Основні облікові агрофізичні та водно-фізичні параметри ґрунту залежно від варіантів дослідів, 2014–2025 рр.

Варіант дослідів	Шар ґрунту, см	ОЩ, г/см ³	ЩС, г/см ³	ТГ, кг/см ²	П _к , %	П _{нк} , %	П _г , %	П _л , %	ВЗ, %	НВГ, %
Облік на 2014 рік										
Абсолютний контроль*	0–10	1,32 ^a	2,55 ^a	13,51 ^a	26,36 ^a	20,44 ^a	21,54 ^a	46,80 ^a	23,87 ^a	23,41 ^c
	10–20	1,36 ^b	2,57 ^a	16,17 ^b	26,78 ^a	19,78 ^b	18,64 ^b	46,56 ^a	26,62 ^b	23,08 ^d
	20–30	1,45 ^c	2,62 ^b	19,56 ^c	25,35 ^b	18,53 ^b	14,98 ^c	43,88 ^b	28,47 ^c	21,81 ^c
Облік на 2019 рік										
Контроль I**	0–10	1,37 ^a	2,61 ^a	15,29 ^a	24,74 ^a	19,74 ^a	20,43 ^a	44,48 ^a	21,54 ^a	22,02 ^c
	10–20	1,41 ^b	2,63 ^a	18,39 ^b	25,29 ^a	19,15 ^a	17,17 ^b	44,44 ^a	24,51 ^b	21,15 ^c
	20–30	1,49 ^c	2,65 ^a	19,44 ^b	23,28 ^b	18,47 ^a	12,22 ^c	41,75 ^b	27,11 ^c	20,29 ^b
Сидерація I***	0–10	1,18 ^a	2,48 ^a	11,24 ^a	27,22 ^a	23,17 ^a	23,61 ^a	50,39 ^a	24,29 ^a	24,85 ^f
	10–20	1,22 ^b	2,51 ^a	14,87 ^b	29,14 ^b	21,17 ^b	20,48 ^b	50,31 ^a	28,15 ^b	23,08 ^d
	20–30	1,29 ^c	2,54 ^b	16,24 ^b	28,84 ^b	19,63 ^c	18,07 ^b	48,47 ^b	30,53 ^c	22,77 ^d
Облік на 2025 рік										
Контроль II****	0–10	1,42 ^a	2,65 ^a	16,18 ^a	24,72 ^a	18,41 ^a	18,23 ^a	43,13 ^a	20,37 ^a	20,51 ^b
	10–20	1,45 ^a	2,67 ^a	19,81 ^b	25,19 ^a	17,12 ^b	15,47 ^b	42,31 ^a	23,86 ^b	19,34 ^a
	20–30	1,49 ^b	2,72 ^b	21,96 ^c	23,92 ^b	16,85 ^b	11,15 ^c	40,77 ^b	28,79 ^c	18,34 ^a
Сидерація II*****	0–10	1,14 ^a	2,39 ^a	10,12 ^a	28,18 ^a	24,59 ^a	25,59 ^a	52,77 ^a	27,63 ^a	25,45 ^g
	10–20	1,17 ^a	2,41 ^a	12,24 ^b	29,89 ^b	23,55 ^b	23,48 ^b	53,44 ^b	33,59 ^b	24,31 ^f
	20–30	1,22 ^b	2,44 ^a	13,21 ^b	29,48 ^b	22,08 ^b	20,22 ^c	51,56 ^c	32,93 ^b	23,82 ^c

Пояснення варіантів: * дані по на початок закладки дослідів; ** чергування культур на ділянці: сорго зернове (2014) – ярий ячмінь (2015) – горох (2016) – ярий ячмінь (2017) – соя (2018); *** застосування проміжної сидерації (сидерат – редька олійна) під культури у схемі чергування їх на ділянці: сорго зернове (2014) – горох (2016) – соя (2018); **** чергування культур на ділянці: яра пшениця (2019) – соняшник (2020) – озимий горох (2021) – нут (2022) – ярий ячмінь (2023) – кукурудза на зерно (2024); ***** застосування проміжної сидерації (сидерат – редька олійна)

під культури у схемі чергування їх на ділянці: соняшник (2020) – нут (2022) – кукурудза на зерно (2024).

Зміст показників: $OШ$ – об’ємна щільність ґрунту, $г/см^3$; $ЩС$ – щільність складення ґрунту, $г/см^3$; $ТГ$ – твердість ґрунту, $кг/см^2$; $П_k$ – капілярна пористість ґрунту, %; $П_{нк}$ – некапілярна пористість ґрунту; $П_a$ – пористість аерації; $П_3$ – загальна пористість ґрунту; $ВЗ$ – водоутримуюча здатність ґрунту, %; $НВГ$ – найменша вологоємність ґрунту, %. Різні малі літери в таблиці вказують на значущі відмінності між варіантами дослідів в одному і тому ж шарі ґрунту ($p < 0,05$).

На основі порівняння варіантів з використанням і без використання сидерації на дату остаточної оцінки (2025 р.) було визначено зменшення об’ємної щільності ґрунту на 19,05 %, щільності складення на 9,95 % та твердості ґрунту на 33,95 %, а також збільшення капілярної пористості на 18,63 %, некапілярної на 34,06 % і пористості аерації на 57,83 %. Найбільші зміни, як у бік збільшення, так і у бік зменшення, спостерігалися в горизонті ґрунту від 10 до 30 см. За тих самих умов, порівняно з варіантом абсолютного контролю (базові показники 2014 року), було відзначено протилежну тенденцію: збільшення щільності на 5,65 %, щільності складення на 3,88 % та твердості ґрунту на 18,18 %, що супроводжувалося зменшенням капілярної пористості на 5,93 %, некапілярної на 10,82 % та пористості аерації на 19,31 %. У цих випадках основні структурні зміни у варіанті без сидератів спостерігалися в шарі ґрунту 0–20 см. Щодо показника загальної пористості, його значення визначалося специфікою формування складових типів пористості на основі розрахункового співвідношення капілярної та некапілярної пористості ґрунту.

Отримані результати підтверджують висновки ряду досліджень щодо позитивного впливу сидерації за участі різних видів рослин на корекцію та оптимізацію агрофізичних складових ґрунтових властивостей [5, с. 50–52; 7, с. 8–10; 9, с. 1537–1539; 13, с. 126–127; 20, с. 314–317; 23, с. 193–194; 24, с. 3–7].

Враховуючи, що зазначені особливості формування основних агрофізичних параметрів ґрунту безпосередньо визначали створення потенційних пористих просторів для руху та утримання води [45, с. 2–3], сидерація вплинула на фундаментальні водні константи ґрунту – водоутримуючу здатність (ВЗ) та найменшу вологоємність (НВГ).

Було встановлено, що систематичне використання редьки олійної як сидерату сприяло збільшенню показника водоутримуючої здатності порівняно з контролем без зеленого добрива на 35,64 % у шарі ґрунту 0–10 см і відповідно на 40,78 % та 14,38 % у шарах ґрунту 10–20 см та 20–30 см.

Ці значення були в середньому на 11 % вищими, ніж отримані в ґрунтах з важчим механічним складом [46, с. 2025–2027], і на 8,7 % нижчими, ніж виявлені в ґрунтах з легшим механічним складом [47, с. 107–110] за варіантів удобрення зеленим добривом.

Щодо показника НВГ відмічено подібний результат – загальний приріст у на рубіжну дату обліку (2025 рік) у співставленні варіанту абсолютного контролю та варіанту сидерації (Сидерація II) був на рівні 8,71 % для шару ґрунту 0–10 см, 5,33 % – для шару ґрунту 10–20 см та 9,22 % для шару ґрунту 20–30 см. Такі результати додатково доводять рубіжного вологозабезпечення та формування передумов для оптимізації вологозабезпечення наступних культур у сівозміні за постсидеральний період їх вирощування.

Отримані результати позитивно співвідносяться з специфічним розвитком кореневої системи редьки олійної під час її літнього (проміжного) використання

як сидерату [48, с. 428–431], що завдяки інтенсивному розгалуженню та швидкому поглибленню сильно впливає на формування структури ґрунтового профілю, його аерацію та, завдяки розкладанню залишків коренів у ґрунті, слугує додатковим ефективним джерелом органічної речовини.

Застосування до отриманого масиву даних аналізу головних компонент (АГК) розраховані компоненти якого відповідно до стандартної застосованої процедури визначення представлено у формі Таблиці 3.

Після оцінки графіка варіанси компонент та показників кумулятивної варіанси з вимогою представлення не менше 80 % кумулятивного накопичення було застосовано двохкомпонентний аналіз, що цілком відповідає підходам до оцінки індексу якості ґрунту (ІЯГ) та стандартним вимогам для такої процедури [49, с. 3–5]. Отримані показники спільності факторів та вагові параметри властивостей ґрунту (w_i) мали близькі абсолютні значення, що підтвердило правильність вибраного масиву даних властивостей ґрунту для розрахунку ІЯГ та відповідало принципам вихідного добору такого масиву відповідно до [50, с. 2–4].

Таблиця 3

Параметри аналізу головних компонент за отриманим масивом властивостей ґрунту у розрізі досліджуваних варіантів сидерації (за сукупністю даних 2014–2025)

Параметри ґрунту*	Головна складова 1 (PC1)	Головна складова 2 (PC2)	Спільні риси	Вага i-го параметра (w_i)
ОЩ	0,983	-0,017	0,967	0,112
ЩС	0,988	0,096	0,985	0,114
ТГ	0,880	-0,444	0,972	0,112
Пк	0,989	0,136	0,996	0,115
П _{нк}	0,880	0,353	0,899	0,104
П _а	-0,972	0,058	0,947	0,110
П _з	0,917	-0,366	0,976	0,113
ВЗ	0,411	0,896	0,972	0,112
НВГ	0,957	-0,114	0,930	0,108
Власне значення	7,339	1,304	—	
Відсоток дисперсії	81,547	14,484		
Кумулятивний відсоток дисперсії	81,547	96,031		

*Зміст показників: ОЩ – об’ємна щільність ґрунту, г/см³; ЩС – щільність складення ґрунту, г/см³; ТГ – твердість ґрунту, кг/см²; Пк – капілярна пористість ґрунту, %; П_{нк} – некапілярна пористість ґрунту; П_а – пористість аерації; П_з – загальна пористість ґрунту; ВЗ – водоутримуюча здатність ґрунту, %; НВГ – найменша вологоємність ґрунту, %.

За результатами нелінійної нормалізації масиву даних параметрів ґрунту за різних варіантів застосування сидерації (табл. 2) та використання визначених їх вагових значень (табл. 3) було визначено сумарний індекс якості ґрунту у розрізі варіантів дослідів. Результати даного показника представлено графічно на рис. 2.

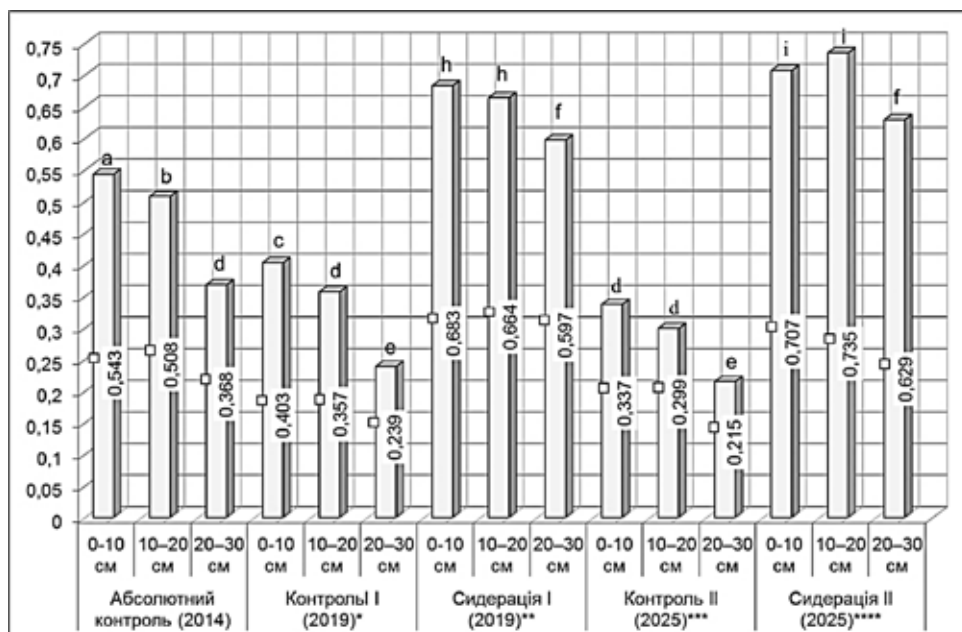


Рис. 2. Індекси якості ґрунту за різних варіантів сидерації, 2014–2025 рр.

Розшифровка варіантів: абсолютний контроль – дані на початок закладки досліджу; * чергування культур на ділянці: сорго зернове (2014) – ярий ячмінь (2015) – горох (2016) – ярий ячмінь (2017) – соя (2018); ** застосування проміжної сидерації під культури у схемі чергування їх на ділянці: сорго зернове (2014) – горох (2016) – соя (2018); *** чергування культур на ділянці: яра пшениця (2019) – соняшник (2020) – озимий горох (2021) – нут (2022) – ярий ячмінь (2023) – кукурудза на зерно (2024); **** застосування проміжної сидерації під культури у схемі чергування їх на ділянці: соняшник (2020) – нут (2022) – кукурудза на зерно (2024).

Застосовуючи градаційну оцінку індексу якості ґрунтів за різноваріантних методичних підходів [51, с. 5–7; 52, с. 4–5; 53, с. 7–9] отриманий індекс якості ґрунту засвідчив істотне поліпшення комплексу агрофізичних та окремих гідрофізичних властивостей за рахунок застосування систематичної сидерації за використання редьки олійної з підвищенням його значення від ґрунтів із задовільним рівнем ґрунтових параметрів родючості (за середнього для шару ґрунту 0–30 см 0,473 у варіанті вихідного абсолютного контролю (для умов 2014 року)) до варіанту рівня добрих умов (у середньому 0,690 для шару ґрунту 0–30 см у варіанті Сидерація II (для умов 2025 року)).

Висновки і перспективи подальших досліджень. На підставі проведених досліджень редьку олійну слід розглядати як ефективний та виробничодоцільний варіант проміжного сидерального використання у сівозмінах різної ротації на сірих лісових ґрунтах за систематичного застосування раз на два роки під культури нехрестоцвітої групи. Такий варіант застосунку в умовах нестійкого зволоження у тривалому часовому вимірі дозволяє в інтегральному варіанті знизити різні рівні щільності ґрунту на 13,58 % на фоні зниження твердості ґрунту щонайменше на третину від вихідних параметрів. Такий характер компанування ґрунтових агрегатів дозволяє оптимізувати пористість ґрунту за загального зростання її

видів у значенні 34,86 % до вихідного контролю. Паралельно із цим встановлено оптимізацію водоутримання ґрунту та зростання величини поргової вологості, що сформувало передумови для поліпшення вологозабезпечення рослин за стресових гідротермічних режимів вегетації та вираженого дефіциту атмосферного зволоження та зростання випаровуваності.

У результаті підсумку за 12 річний період сидерації досягнуто зростання індексу якості ґрунту в середньому для шару ґрунту 0–30 см за агрофізичними та окремими гідрофізичними характеристиками у значенні прирістного показника в 1,459 з рівня 0,473 за стартових умов досліді до 0,690 на дату рубіжного контролю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Dexter A.R., Czyz E.A. Applications of S-theory in the study of soil physical degradation and its consequences. *Land Degradation & Development*. 2007. Vol. 18. 369.
2. Olsson, L.H., Barbosa, S., Bhadwal A., Cowie, K., Delusca, D., Flores-Renteria, K., Hermans, E., Jobbagy, W., Kurz D., Li, D.J., Sonwa, L. Land Degradation: 2020, in: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate, 2020. Vol. 4. P. 345–436.
3. Kimetu J.M., Lehmann J., Ngoze S.O., Mugendi D.N., Kinyangi J.M., Riha S., Verchot L., Recha J.W., Pell A.N. Reversibility of soil productivity decline with organic matter of differing quality along a degradation gradient. *Ecosystems*. 2008. Vol. 11. P. 726–739.
4. Busari M. A., Kukal S. S., Kaur A., Bhatt R., Dulazi A. A. Conservation tillage impacts on soil, crop and the environment. *International Soil and Water Conservation Research*. 2015. Vol. 3. № 2. P. 119–129.
5. 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.
6. 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.
7. Lei B., Wang J., Yao H. Ecological and environmental benefits of planting green manure in paddy fields. *Agriculture*. 2022. Vol. 12. № 2. 223.
8. 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.
9. Zhang Z.H., Jun L., Hai W., Cui-lan W., Yun L., Yu-lin, L., Yan-hong G.P., Zhuou S.J., Cao W.D. The effects of co-utilizing green manure and rice straw on soil aggregates and soil carbon stability in a paddy soil in southern China. *Journal of Integrative Agriculture*. 2023. Vol. 22. № 5. P. 1529–1545.
10. 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.
11. 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.
12. Hou P., Xue L., Wang J., Petropoulos E., Xue L., Yang L. Green Manure Amendment in Paddies Improves Soil Carbon Sequestration but Cannot Substitute the Critical Role of N Fertilizer in Rice Production. *Agronomy*. 2022. Vol. 12. № 7. 1548.
13. 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.

14. Talgre L Biomass production of different green manure crops and their effect on the succeeding crops yield. A Thesis for applying for the degree of Doctor of Philosophy in Plant Production. Institute of Agricultural and Environmental Sciences Estonian University of Life Sciences. Tartu 2013. 164 p.
 15. 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.
 16. Natera J.F.Z., López P.M.G, Jimenez C.E.A., Aguilar F.B.M., Solís H.V., Hernández I.Z. Decomposition and nitrogen mineralisation of two wild lupins (Leguminosae) species with potential as green manures. *Journal of Central European Agriculture*. 2022. Vol. 23. № 2. P. 384–390.
 17. Kim K.M., Lee B.J., Cho Y.S. Differences of soil carbon by green manure crops in rotated cropping system. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*. 2012. Vol. 45. № 6. P. 1027–1031.
 18. Agbede T., Adekiya A., Ale M., Eifediyi E., Olatunji C. Effects of green manures and npk fertilizer on soil properties, tomato yield and quality in the forest-savanna ecology of Nigeria. *Experimental Agriculture*. 2019. Vol. 55. № 5. P. 793–806.
 19. Cavigelli M.A., Thien S.J. Phosphorus bioavailability following incorporation of green manure crops. *Soil Science Society of America Journal*. 2003. Vol. 67. P. 1186–1194.
 20. Sumiahadi A, Acar R, Özel A Green Manure for Soil Properties Improvement. In2nd International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology. *EurasianSciEnTech 2020*. 2020. P. 312–320.
 21. Hansen, V., Müller-Stöver, D. & Magid J. 2022. Green manure crops for low fertility soils URL: https://orgrprints.org/id/eprint/37832/1/poster_Veronika%20Hansen.pdf (date of application 09.09.2025).
 22. 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.
 23. Lee C.-R., Kim S.H., Oh Y., Kim Y.J., Lee S.-M. Effect of Green Manure on Water-Stable Soil Aggregates and Carbon Storage in Paddy Soil. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*. 2023. Vol. 56. № 2. P. 191–198.
 24. Ansari M.A., Choudhury B.U.J., Layek A. Das, 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. 105318.
 25. Urbanek E., Horn R., Smucker A.J.M. Tensile and erosive strength of soil macro-aggregates from soils under different management system. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 2014. Vol. 62. № 4. P. 324–333.
 26. Wiesmeier M., Steffens M., Mueller C.W., Kölbl A., Reszkowska A., Peth S., Horn R., Kögel-Knabner I. Aggregate stability and physical protection of soil organic carbon in semi-arid steppe soils. *European Journal of Soil Science*. 2012. Vol. 63. № 1. P. 22–31.
 27. Burr-Hersey J.E., Mooney S.J., Bengough A.G., Mairhofer S., Ritz K. Developmental morphology of cover crop species exhibit contrasting behaviour to changes in soil bulk density, revealed by X-ray computed tomography. *PLoS ONE*. 2017. Vol. 12. № 7. e0181872.
 28. 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.
 29. Toleikiene M., Arlauskienė A., Fliesbach A., Iqbal R., Sarunaite L., Kadziuliene Z. The decomposition of standardised organic materials in loam and clay loam arable soils during a non-vegetation period. *Soil and Water Research*. 2020. Vol. 15. № 3. P. 181–190.
-

30. Tsytsiura 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.
31. 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 pp.
32. 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.
33. Undersander D., Mertens D.R., Thiex N. Forage analyses. Procedures. National Forage Testing Association. 1993. 139 p.
34. 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.
35. ASTM-D854 2010. Standard Test for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM Int. 17 p.
36. 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). 102133.
37. Bittelli M. 2011. Measuring Soil Water Content: A Review. *HortTechnology*. 2011. Vol. 21. № 3. P. 293–300.
38. Gould S. A guide to soil moisture. 2024. URL: <https://connectedcrops.ca/the-ultimate-guide-to-soil-moisture/> (date of application 05.09.2025).
39. 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. 1322660.
40. 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. 173335.
41. 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.
42. Tsytsiura Y.H. Modular-vitality and ideotypical approach in evaluating the efficiency of construction of oilseed radish agrophytocenoses (*Raphanus sativus* var. *oleifera* Pers.). *Agraarteadus*. 2020. Vol. 31. № 2. P. 219–243.
43. Wang X., Ma H., Guan C., Guan M. Decomposition of Rapeseed Green Manure and Its Effect on Soil under Two Residue Return Levels. *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Is. 17. e11102.
44. Clark A. Managing cover crops profitably. DIANE Publishing (3rd ed.). 2008. 248 p.
45. Rasheed M. W., Tang J., Sarwar A., Shah S., Saddique N., Khan M. U., Imran Khan M., Nawaz S., Shamshiri R. R., Aziz M., Sultan M. Soil Moisture Measuring Techniques and Factors Affecting the Moisture Dynamics: A Comprehensive Review. *Sustainability*. 2022. Vol. 14. № 18. 11538.
46. dos Santos, N.G., de Souza, T.A.F. & da Silva, L.J.R. Soil physico-chemical properties, biomass production, and root density in a green manure farming system from tropical ecosystem. North-eastern Brazil. *Journal of Soils and Sediments*. 2021. Vol. 21. P. 2203–2211.
47. Пліско І.В. Просторово диференційована система управління якістю ґрунтів (на прикладі орних земель України): дисертація на здобуття наукового ступеня

доктора сільськогосподарських наук: спеціальність 06.01.03 – Агрогрунтознавство та агрофізика. Національний дослідницький центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії ім. А.Н. Соколовського». Харків, 2019, 489 с.

48. 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.

49. He Y., Song X., Li X., Gao Y., Yang J., Chen J., Chen J., Cai C. Spatial Properties of Soil Physical Quality Index S in Black Soil Croplands under Permanent Gully Erosion. *Land*. 2023. Vol. 12. 1641.

50. Simfukw P., Hill P.W., Emmett B.A., Jones D.L. Identification and predictability of soil quality indicators from conventional soil and vegetation classifications. *PLoS ONE*. 2021. Vol. 16. № 10. e0248665.

51. 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 pp.

52. 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. 864.

53. Doran J.W., Parkin T.B. Defining and Assessing Soil Quality. In: Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicek, D.F. and Stewart, B.A., Eds., *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. Soil Science Society of America Journal*. 1994, 3–21.

Дата першого надходження рукопису до видання: 25.09.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 30.10.2025

Дата публікації: 05.12.2025