

УДК 635.15:631.5

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.144.28>

СИДЕРАЛЬНА ЦІННІСТЬ КОРЕНЕВИХ РЕШТОК РЕДЬКИ ОЛІЙНОЇ У ПРАКТИЦІ ЛІТНЬОГО СИДЕРАЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ

Цицюра Я.Г. – к.с.-г.н., доцент,

доцент кафедри землеробства, ґрунтознавства та агрохімії,

Вінницький національний аграрний університет

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

Сучасні системи удобрення поступово переходять на біоорганічні варіанти з частковим заміщенням класичних мінеральних компонентів на природні і екологічно орієнтовані джерела органіки, в тому числі і рослинного походження. Це зумовлено стійким зростанням вартості агрохімічних ресурсів в тому числі мінеральних добрив та їх похідних, зниження загальної доступності класичних органічних добрив тваринного походження за рахунок як зниження поголів'я, так і біоенергетичних технологій їх використання у галузі тваринництва, а також в значній мірі за рахунок стійкої тенденції до деградації ґрунтів та зниження потенціалу їх природньої родючості.

Вказані об'єктивні причини спонукають до повернення ідомих технологічних рішень сидерального удобрення за рахунок використання лінійки різних видів рослин, адаптованих до різних ґрунтово-кліматичних умов та рівнів природньої родючості ґрунтового покриву.

За одинадцятирічний період досліджень з використанням широко поширеного сорту редьки олійної Журавка в умовах нестійкого зволоження на сірих лісових ґрунтах типових для умов Центрального агроґрунтового району Вінниччини для умов весняного строку сівби сидерату та проведення безпосередньо сидерації на другу-третю декаду червня – досліджено як особливості продуктивного накопичення кореневої біомаси рослин-сидерату, так і визначено основні та похідні параметри її біохімічного складу з метою оцінки сидераційного потенціалу кореневих решток.

Для оцінки біопродуктивного потенціалу формування та вихначення основних складових біохімічного складу було застосовано широкоапробовані методики з використанням польових та лабораторних методів аналізу, які застосовуються у практиці сертифікованих та акредитованих лабораторій.

У результатуючому підсумку встановлено висока адаптивна біопродуктивність редьки олійної як сидерату за весняного строку сівби в умовах нестійкого зволоження із досягненим середнім потенціалом до 24 т/га надземної та 8,5 т/га кореневої біомаси (4,83 т/га у загальній сухій біомасі). Доведена стабілізуюча роль кореневої біомаси у оптимізації процесів загального ґрунтового розкладу сформованої сидеральної маси рослин за рахунок уповільнення таких темпів за літніх строків сидерального застосування.

Встановлена цінність кореневих решток редьки олійної як додаткового джерела 23–35 кг/га азоту, 8–12 кг/га фосфору, 48–57 кг/га калію, 8–14 кг/га кальцію та 11–17 кг/га сірки за високого біофумігаційного потенціалу з виходом глюкозинолатів до 31,17 моль/га.

Ключові слова: кореневі рештки, сидеральний потенціал, біохімічний склад, розкладання в ґрунті, акумуляція поживних речовин, бофумігація.

Tsytsiura Ya.G. Green manure potential of oilseed radish root residues under summer incorporation practices

Modern fertilization systems are gradually shifting toward bio-organic options, partially replacing traditional mineral components with natural and environmentally oriented organic sources, including those of plant origin. This transition is driven by the steadily increasing cost of agrochemical resources, including mineral fertilizers and their derivatives; the reduced overall availability of traditional animal-based organic fertilizers due to a decline in livestock populations and the use of bioenergy technologies in animal husbandry; as well as the persistent trend of soil degradation and the declining potential of natural soil fertility.

These objective factors encourage a return to well-known technological solutions such as green manure fertilization, using a variety of plant species adapted to different soil and climatic conditions and levels of natural soil fertility.

Over an eleven-year period of research using the widely distributed oilseed radish variety Zhuravka, under conditions of unstable moisture on grey forest soils typical of the Central agro-soil region of Vinnytsia, in spring sowing conditions and with green manure incorporation scheduled for the second or third ten-day period of June, both the productivity of root biomass accumulation in green manure plants and the main and derivative parameters of its biochemical composition were studied in order to assess the green manure potential of root residues.

To assess the bioproductive potential and determine the main components of biochemical composition, well-established methodologies were applied, involving field and laboratory analysis techniques used in certified and accredited laboratories.

As a result, oilseed radish demonstrated high adaptive bioproductivity as a green manure crop when sown in spring under conditions of unstable moisture, achieving an average potential of up to 24 tons/ha of above-ground biomass and 8.5 tons/ha of root biomass (4.83 tons/ha in total dry biomass). The stabilizing role of root biomass was confirmed in optimizing the overall decomposition processes of green manure plant mass in the soil due to a slower decomposition rate during summer incorporation periods.

The value of oilseed radish root residues was determined as an additional source of 23–35 kg/ha of nitrogen, 8–12 kg/ha of phosphorus, 48–57 kg/ha of potassium, 8–14 kg/ha of calcium, and 11–17 kg/ha of sulfur, with a high biofumigation potential yielding up to 31.17 mol/ha of glucosinolates.

Key words: root residues, green manure potential, biochemical composition, soil decomposition, nutrient accumulation, biofumigation.

Постановка проблеми. Вирощування культур у межах сівозміни супроводжується отриманням як основної так і побічної продукції. Остання поділяється на відходи у процесі технологічного збирання, а інша – кореневі рештки, які залишаються у профілі ґрунту. Саме кореневі рештки розцінюються як одне із важливих супутніх ресурсів сидерального типу, цінність якого істотно різниться для сільськогосподарських культур різного біологічного виду [1, с. 122–123].

Зарубіжний досвід засвідчує [2, с. 2–3], що врахування кореневих решток у зведеному балансі органіки є обов'язковим, оскільки частка кореневих решток у сприятливій для росту і розвитку роки може досягати рівня 30–40% надземної листостеблової маси. Разом із тим важливим є не обсяг сформованої біопродуктивності кореневої системи, особливо у варіанті сидеральних технологій, а біохімічна її цінність з огляду на можливість альтернативного використання у біоорганічних варіантах удобрення [3, с. 2]. З цих причин в останні роки активізувалися дослідження з вивчення сидеральної цінності кореневих решток різних сільськогосподарських культур зернової [4, с. 298–299], зернобобової [5, с. 385] та хрестоцвітої груп [6, с. 7–9]. Вказані вивчення зосереджені на різних аспектах вже відміченої сидеральної цінності від впливу на комплекс властивостей ґрунту [7, с. 47–48] до темпів мінералізації у ґрунтовому профілі та участі у динаміці балансу основних макро- та мікроелементів [8, с. 2–3] вплив на структуру мікробіологічного комплексу ґрунту та оптимізацію накопичення органічного вуглецю [9, с. 67–68].

Враховуючи, що у структурі сидерального клину в Україні домінують культури із хрестоцвітої групи рослин, а редька олійна набуває популярності як культура багатоцільового використання [10, с. 1026–1027; 11, с. 265–266] – актуальним питанням, яке потребує відповідного наукового узагальнення є дослідження цінності кореневих решток редьки олійної з позиції її біохімічного потенціалу та в якості додаткового компоненту у структурі загальної сидеральної продуктивності рослин за весняного строку сівби редьки олійної.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Встановлено [10, с. 1027], що хрестоцвіті культури ярої біологічної групи за досить короткий період вегетації формують кореневу біомасу, яка залежно від гідротермічних умов вегетації досягає рівня від 0,8 до 2,5 т/га у сухій речовині. Такий показник продуктивності дозволяє віднести хрестоцвіті види сидератів до культур з високим потенціалом як загальної біомаси рослин, так і до активних компонентів агроценозу за

показником впливу на ґрунт та його агрофізичні та агрохімічні режими і властивості [12, с. 2–3; 13, с. 794; 14, с. 1186–1187].

Традиційно за сидерального варіанту використання хрестоцвітних в Україні ярої групи увага концентрується на таких культурах як гірчиця біла, ріпак ярий, суріпиця яра [15, с. 1–2]. Редька олійна серед цих культур займає особливе місце. Володіючи комплексними адаптивним потенціалом як покривна культура для зон достатнього та нестійкого зволоження [10, с. 1027–1028] вона демонструє значний як сидеральний потенціал за обсяги сформованої надземної маси та її біохімічним складом [11, с. 267], так і за можливістю чутливої реакції зміною маси сформованих кореневих решток залежно від варіантів припосівного конструювання її ценозів [16, с. 222–224]. Останній фактор дозволяє ефективно управляти рівнями біопродуктивності рослини в цілому залежно від зміни таких параметрів як кількісна норма висіву, ширина міжрядь, норма удобрення тощо [16, с. 237].

Останні дослідження проведені на сидеральних варіантах вирощування редьки олійної [17, с. 5–10] засвідчили високо адаптивні механізми розвитку і формування її кореневої системи з позиції радіального та вертикального галузнення у ґрунті, позитивного впливу на зниження щільності ґрунту, підвищення загальної та капілярної пористості, забезпечення оптимізації балансу органічного вуглецю та основних макро- та мікроелементів.

Попередніми дослідженнями [6, с. 25–30] підкреслюється що кореневі рештки редьки олійної містять досить високу концентрацію фосфору, калію та кальцію, що може бути використано з позиції ліквідації дефіциту цих елементів за варіантів сидерального різнострокового використання даної культури.

Визначено також позитивні властивості біохімічного складу кореневих решток редьки олійної з огляду на вміст глюкозинолатів, які розглядаються у рамках складового біофумігаційного потенціалу культури та можуть з успіхом застосовуватись у органічно орієнтованих технологіях реабілітації деградованих ґрунтів з огляду на поліпшення їх мікробіологічного та сидерального стану [18, с. 4–9; 19, с. 802–803; 20, с. 62–63; 21, с. 2–4], зниження рівня сегетальної деградації ґрунту та зниження його фітотоксичності залежно від варіантів чергування культур у сівозміні та інтенсивності сівозміни з позиції концентрації окремих груп культур [22, с. 1–4].

Поряд із дослідженими аспектами наголошується, що редька олійна потребує подальших досліджень у зв'язку із зміною клімату територій, посиленням процесів ґрунтової деградації та загальними процесами диверсифікації структури агропромислового виробництва сільськогосподарських територій України [23, с. 185–187]. Це особливо актуальне з огляду на проведення тривалого біохімічного моніторингу якості сидеральної маси даної культури та сформованих кореневих решток зокрема [24, с. 53–55]. Важливим при цьому залишається вивчення максимально можливого спектру показників, що дозволить оцінити сидеральний потенціал культури з позиції формування підземної (кореневої) біомаси та дозволить у перспективі окреслити основні концептуальні положення використання редьки олійної у біоорганічних (сидеральних) системах вирощування сільськогосподарських культур з огляду на ґрунтові та гідротермічні ресурси відповідних територій. З цих позицій представлені у статті результати тривалих досліджень є актуальними для наукової та виробничої практики альтернативних та адаптивних систем землеробства.

Метою дослідження було дослідити цінність кореневих решток редьки олійної як додаткового компоненту її сидерального використання за весняного строку сівби з позиції біохімічного складу та як джерела відповідних компонентів у системі біоорганічних варіантів удобрення.

Результати досліджень даної статті отримано у рамках виконання тематики з фінансуванням за кошти загального фонду державного бюджету «Розробка екологоорієнтованих технологій вирощування біоенергетичних культур для забезпечення енергонезалежності та ґрунтозбереження задля формування кліматичної нейтральності» (№ держреєстрації 0124U000483).

Матеріали та методика досліджень. Період досліджень і оцінок тривав з 2014 по 2024 рр. в умовах дослідного поля Віницького національного аграрного університету (N 49°11'31", E 28°22'16"). Ґрунтовий покрив дослідного поля був представлений сірими лісовими ґрунтами за таких середніх показників ґрунтових умов родючості: 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 при pH_{KCl} 5,8.

У якості об'єкта було обрано сорт сорт редьки олійної Журавка. Посів було проведено у першій–другій декаді квітня за кількісної норми висіву 2,5 млн. схожих насінин при міжрядді 15 см без застосування мінеральних добрив. Оцінку морфологічних та біохімічних параметрів корневих систем редьки олійної проводили за досягненням рослинами фази цвітіння (ВВСН 64–67), визначеної як оптимального строку для сидерації культури [18, с. 3–5]. Календарно цей термін відповідав другій–третьій декаді червня. Схема досліду передбачала варіант чотирьохразових повторень розміщення дослідних ділянок у два яруси за схемою повної рендомізації. Площа облікової ділянки – 25 м².

Для ідентифікації феностадійного розвитку рослин редьки олійної було застосовано стандартну шкалу періодизації її розвитку ВВСН [25, с. 10–11]. Для обліку сформованої кореневої біомаси рослин у межах облікової площі дослідних ділянок було застосовано апробований метод монолітів на підставі методичної деталізації [26, с. 2–5]. Процес формування монолітів передбачав покроковий варіант аналізу за профілем ґрунту з кроком в 10 см. Для цього було застосовано металічні коробки совкового типу при товщині стінок 3 mm та розміром 30 см×33,3 см×10 см (обліковий об'єм ~0.01 м³). Відібрані таким чином мікромоноліти маркувались та поміщались у герметичні на застібці пакети за послідууючого їх збереження за температури на рівні 5 °С. У послідууючому аналізі моноліти відмивались водою для отримання відмитих корневих решток та їх загально вагового аналізу. Для промивання і відділення корневих решток від ґрунту при промиванні було використано колонку з решіт лабораторних із дротяної сітки (порядок розмірів решіт 4.0 мм, 2.0 мм, 1.0 мм, 0.5 мм та 0.25 мм).

Вміст сухої речовини у корневих рештках визначали стандартним методом висушування при 105 °С до постійної ваги із процедурою наступного озолування при температурі 550 °С [27, с. 15–22]. Формування кореневої біомаси визначали на підставі перевідної калькуляції з облікової площі на гектарну відповідно до [28, с. 11–18].

Повний біохімічна оцінка якісного складу кореневої маси редьки олійної з розрахунку показників на абсолютно суху речовину була проведена у відповідності до рекомендованих стандартних протоколів такого аналізу, хід якого повністю в деталях описано нами у попередніх публікаціях [10, с. 1028–1031].

Для оцінки гідротермічних умов періоду оцінок було використано стандартні параметри такі як: середньодобова температура (°С), сума опадів (мм), відносна вологість повітря (%), гідротермічний коефіцієнт (ГТК) (рівняння 1), індекс посушливості Де Мартонна (I_{DM}) (рівняння 2), коефіцієнт зволоження (K_z) (рівняння 3).

$$ГТК = \frac{\sum R}{0.1 \times \sum t_{>10}} \quad (1)$$

де: $\sum R$ – сума опадів (мм) за період з температурою вище 10 °С, $\sum t_{>10}$ – сума ефективних температур за той самий період. Шкала ранжування режимів за ГТК >

1,6 – надмірно вологий період, ГТК 1,3–1,6 – вологий період, ГТК 1,0–1,3 – помірно сухий період, ГТК 0,7–1,0 – сухий період, ГТК 0,4–0,7 – дуже сухий період.

$$I_{DM} = \frac{12P_m}{T_m + 10} \quad (2)$$

де P_m і T_m – кількість опадів і середня температура повітря у відповідному місяці (шкала ранжування клімату за IDM: $IDM < 10$ посушливий; напівпосушливий $10 \leq IDM < 20$; середземноморський $20 \leq IDM < 24$; напіввологий $24 \leq IDM < 28$; вологий $28 \leq IDM < 35$; дуже вологий $35 \leq IDM \leq 55$; надзвичайно вологий $IDM > 55$).

$$K_z = \frac{P}{E} \quad (3)$$

де: K_h – коефіцієнт зволоження; P – сума опадів за аналізований період, мм; E – випаровуваність за аналізований період, мм (рівнянням 4) (ступінь вологості за K_z : $K_z > 1,0$ – надмірна, K_z близька до 1 – оптимальна, $K_z = 1,0$ –0,6 – нестабільна, $K_z = 0,6$ –0,3 – недостатня).

$$E = 0,0018 \times (25 + t)^2 \times (100 - a) \quad (4)$$

де за аналізований період: t – середня температура повітря °C; a – середня вологість повітря, %.

Зведені результати гідротермічних умов росту і розвитку редьки олійної представлено у таблиці 1.

Статистична інтерпретація результатів досліджень передбачала послідовне використання основних показників варіаційної статистики (стандартне відхилення (SD), коефіцієнт варіації (C_v) на рівнях значущості $p < 0.05$ та $p < 0.01$. Для обробки даних було використано програму Statistica 10 (StatSoft – Dell Software Company, USA). Істотність різниці між отриманими середніми значеннями показників у межах років вивчення встановлювалась шляхом використання дисперсійного аналізу з оцінкою за рахунок найменшої істотної різниці та застосування системного тесту Т'юкі на рівні статистичної значущості $p < 0.05$.

Таблиця 1

Оцінка значень гідротермічних режимів періоду активної вегетації редьки олійної (зона Dfa/Dfb (Köppen-Geiger climate classification)), 2014–2024 рр.

Рік	Сума опадів, мм (VII-X)	t_{aver}^* °C (VII-X)	Місяці періоду вегетації								
			IV			V			VI		
			ГТК	I_{DM}	K_z	ГТК	I_{DM}	K_z	ГТК	I_{DM}	K_z
2014	339,6	13,84	0,725	45,7	1,18	3,928	88,9	2,11	1,545	34,8	0,83
2015	142,3	14,36	0,645	37,3	0,78	0,917	20,6	0,41	0,715	16,9	0,27
2016	193,4	15,06	0,296	21,6	0,44	0,489	40,4	0,99	1,265	29,9	0,75
2017	125,1	14,07	3,919	39,2	0,75	0,777	16,8	0,34	0,504	11,9	0,22
2018	170,8	16,38	0,290	10,8	0,19	0,308	7,2	0,12	4,404	103,7	2,31
2019	398,5	15,39	0,565	33,5	0,72	4,902	111,0	3,29	1,682	41,4	0,96
2020	343,8	13,67	0,091	36,4	0,50	5,327	106,4	3,18	1,548	37,3	0,89
2021	282,8	13,26	0,233	38,8	0,96	3,125	66,7	1,64	1,679	39,8	1,00
2022	242,1	14,30	0,563	57,4	2,33	1,430	31,3	0,79	1,496	36,1	0,85
2023	239,8	14,18	1,543	91,5	3,33	0,085	1,90	0,04	1,640	38,9	0,87
2024	262,1	16,27	3,259	47,5	3,18	0,577	13,19	0,24	1,660	40,4	0,98

* середня середньодобова температура (°C).

Виклад основного матеріалу дослідження. Результати оцінки морфометрії кореневої системи редьки олійної засвідчують багаторівневий характер її розвитку із вираженою стрижневою частиною (рис. 1), яка за загальною масою по відношенні до відмитої частини корневих решток займає середньо багаторічну частку на рівні 65,6% залежно від року (для років із вираженим дефіцитом зволоження ця частка була істотно меншою).

Слід зауважити, що наявність такої стрижневої частини кореневої системи розглядається у випадку редьки олійної як позитивний фактор впливу на ґрунт за рахунок так званого ефекту ґрунтового дренажу шляхом безпосереднього формування вертикальних корневих каналів, які утворюються як у процесі росту власне кореня, так і у процесі його послідовного розкладу у ґрунті [28, с. 12–20]. Визначено також, у багаторічному вимірі належність редьки олійної до високопродуктивних культур за сидерального конструювання її агроценозу (табл. 2).



Рис. 1. Стрижневий корінь редьки олійної з елементами первинногогалуження послідовно відібраний із середнього рядка облікової ділянки 1 м² для двох несуміжних повторень на фенофазу цвітіння (ВВСН 64–67), 2024 р.

Таблиця 2

**Показники сидеральної біопродуктивності рослин редьки олійної
за літнього сидерального їх використання на фазу цвітіння (ВВСН 64–67),
2014–2024**

Показники біопродуктив- ності	Період оцінки, роки											НІР _{0,5}
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	
Сформована надземна біомаса, т/га	33,49	20,11	21,29	15,22	13,89	35,75	30,88	24,12	21,18	24,48	20,12	1,42
Сформована надземна біомаса у сухій речовині, т/га	4,10	2,84	3,02	2,09	2,10	4,03	3,93	2,85	2,81	3,20	2,71	0,23
Сформована коренева біомаса, т/га	13,28	7,88	6,22	4,47	3,39	14,85	13,02	9,57	7,44	6,87	5,97	1,09
Сформована коренева біомаса у сухій речовині, т/га	2,71	1,82	1,35	1,02	0,81	3,07	2,58	1,83	1,60	1,45	1,23	0,25
Коефіцієнт продуктивності кореневої системи (у сухій речовині)	1,51	1,56	2,24	2,05	2,59	1,31	1,52	1,56	1,76	2,21	2,20	0,33
Частка кореневих решток у сформованій біомасі рослин (у сухій речовині)	39,83	39,08	30,91	32,79	27,89	43,25	39,65	39,07	36,22	31,16	31,22	0,52

У середньо багаторічному вимірі величина сформованої надземної маси у досліді становила 23,68 т/га (при міжрічному варіюванні 29,84%). При цьому показник сформованої кореневої біомаси становив 8,45 т/га (за міжрічного варіювання 44,72%). У еквіваленті сухої речовини вказані значення були на рівні 3,06 т/га (22,96%) та 1,77 т/га (41,21%). Такий характер формування надземної та кореневої біомаси забезпечив середньо багаторічний коефіцієнт продуктивності кореневої системи у значенні 1,86 (22,0%) за частки кореневої маси у загальній біомасі рослин 35,55% (за міжрічного варіювання 13,93%).

Враховуючи, що для умов правобережного Лісостепу сидеральна продуктивність гірчиці білої та ріпаку ярого вкладається переважно в інтервалі 14,5–27,6 т/га надземної маси та 4,5–9,7 т/га кореневої [29, с. 4–5] – редьку олійну за результатами проведених оцінок слід віднести до культур з високим сидеральним біопродуктивним потенціалом, з огляду на потенціал родючості ґрунтів на яких проведено багаторічний цикл оцінок та умов нестійкого зволоження (за представленим аналізом гідротермічного режиму території (табл. 1)). Виходячи з отриманого кореляційного зв'язку за період проведених оцінок сформована біомаса коренів

редьки олійної за коефіцієнтом детермінації d_{xy} (квадрат коефіцієнту кореляції з добутком на 100 для відсоткового виразу) з прямим характером залежності при d_{xy} на рівні 64,7% визначається сумою опадів, з таким же характером залежності на 42,8% показником ГТК, на 39,74% показником I_{DM} та на 44,15% показником K_3 . При цьому залежність від рівня середньодобової температури була оберненою при середньобагаторічному значенні d_{xy} на рівні 33,10%. Таким чином, головним лімітуючим фактором формування кореневої біомаси рослин є рівень вологозабезпечення періоду вегетації з оптимумом достатнього зволоження за помірних темпів наростання середньодобових температур. З іншого боку, значення d_{xy} для основних гідротермічних коефіцієнтів нижче 50% вказує на наявність адаптивних механізмів росту і розвитку рослин редьки олійної, що створює передумови для ефективної можливості застосування сидеральних агроценозів редьки олійної і в умовах нестійкого зволоження, що позитивно узгоджується із рядом проведених досліджень [10, с. 1055–1057; 28, с. 25–30].

Визначено цінність кореневої біомаси редьки олійної з огляду на визначений її біохімічний склад (табл. 3). По результатах такої оцінки кореневі рештки культури мають середньобагаторічний показник вмісту органічної сухої речовини у значенні 21,35% (при міжрічному варіюванні за коефіцієнтом варіації (C_v) 6,89%). При цьому кореневі рештки багаті як сирим протеїном (8,10% (при $C_v = 14,47\%$)), так і загальним вмістом азоту (ЗВА) – 1,30% та 14,46% відповідно. Враховуючи значення вмісту органічного вуглецю (ОВ) на рівні 39,56% (при $C_v = 2,80$) – середнє співвідношення $C(ОВ)/N$ (ЗВА) (табл. 4) було у значенні 31,0 (при $C_v = 11,78\%$). Враховуючи, що оптимальне значення співвідношення $C(ОВ)/N(ЗВА)$, для забезпечення оптимізованих темпів розкладення сидеральної маси у профілі ґрунту і послідувочої іммобілізації отриманих компонентів має бути на рівні 25–30 [4, с. 299–300] – коренева біомаса редьки олійної матиме потенційно істотно нижчі темпи ґрунтового розкладу ніж надземна її біомаса на підставі попереднього вивчення [10, 1033–1036]. Це дозволяє розглядати кореневі рештки культури як стабілізуючий чинник зниження інтенсивності темпів мінералізації сидерату у ґрунті, що є важливим у випадку літніх строків сидерації де за низького співвідношення C/N процес ґрунтового розкладення сидеральної маси проходить з надмірною інтенсивністю, що веде до втрати вивільнених макро- і мікроелементів та органічних похідних [5, с. 386–387].

Разом із тим кореневі рештки редьки олійної багаті на рослинний жир за середньобагаторічного його вмісту на рівні 1,86% (при міжрічному варіюванні 30,44%). Наявність рослинних жирів у складі корневих решток сприяє у процесі їх розкладу стадії гідролізу, що формує інтенсивний період мінералізації. Разом із тим вміст жирів вимагає відповідних вищих рівнів вологості ґрунту для інтенсивних процесів ґрунтового розкладення рослинної маси із істотно нижчим даним показником [9, с. 68–69; 17, 10–12].

Відмічені повільні темпи розкладення корневих решток редьки олійної позитивно узгоджуються із результатами обліку вмісту сирової клітковини та структурних її компонентів – целюлози, геміцелюлози, нейтрально дитергентної клітковини (НДК) та кислотно-дитергентної клітковини (КДК). Вміст сирової клітковини у корневих решток редьки олійної літнього сидерального використання був на рівні 48,61% (за міжрічного варіювання показника 8,90%).

Таблиця 3

**Біохімічний склад кореневих решток редьки олійної у варіанті
весняного строку її сівби та сидерального послідуєного використання
(у % на абсолютно суху речовину), 2014–2024 рр.**

Рік	Органічна суха речовина (ОР)	Сирий протеїн (СП)	Сирий жир (СЖ)	Сира квітковина (СК)	Сира зола(СЗ)	Нейтрально- дигерентна квітковина (НДК)	Кислотн- дигерентна квітковина (КДК)	Ліпін (Л)
2014	20,42	8,00	1,31	43,48	5,26	51,27	46,13	12,45
2015	23,12	8,88	2,59	53,79	6,93	58,85	55,75	14,34
2016	21,73	8,38	1,84	49,38	5,34	56,28	53,15	13,11
2017	22,84	10,50	2,91	52,77	7,15	56,92	54,48	15,78
2018	23,95	9,44	1,79	47,03	7,88	53,58	50,54	14,09
2019	20,68	7,06	1,18	41,60	7,22	48,37	44,41	11,89
2020	19,84	7,63	1,92	47,79	6,23	54,11	50,55	12,61
2021	19,09	6,56	1,77	50,69	7,15	55,59	52,85	12,48
2022	21,47	6,94	2,43	55,26	8,24	58,83	56,62	12,91
2023	21,11	7,44	1,47	48,19	6,88	53,36	50,57	12,77
2024	20,59	8,25	1,29	44,75	7,19	46,91	42,89	13,85
$R_{\min}^* p_{adj} < 0,05$	0,92- 1,11	0,77-0,93	0,29-0,58	0,85-0,99	1,37-1,52	1,25- 1,44	1,12- 1,32	0,53- 0,61
HP_{05}	1,07	0,85	0,46	0,95	1,45	1,32	1,20	0,59

Рік	Целюлоза	Геміцелюлоза	Загальний вміст азоту (ЗВА)	Органічний вуглець(ОВ)	Загальний вміст фосфору (Р)	Загальний вміст калію (К)	Вміст кальцію (Са)	Загальний вміст сірки (S)	Вміст глюкозидів мкмоль/г (ГК)
2014	33,68	5,14	1,28	39,22	0,31	2,08	0,49	0,52	16,46
2015	41,41	3,10	1,42	40,74	0,44	2,83	0,41	0,65	16,18
2016	40,04	3,13	1,34	39,25	0,55	3,65	0,53	0,80	19,19
2017	38,70	2,44	1,68	41,31	0,62	4,75	0,57	0,89	20,93
2018	36,45	3,04	1,51	39,84	0,51	3,01	0,49	0,77	20,95
2019	32,52	3,96	1,13	37,42	0,37	1,69	0,38	0,54	15,83
2020	37,94	3,56	1,22	40,08	0,45	3,48	0,41	0,58	18,82
2021	40,37	2,74	1,05	38,35	0,29	2,14	0,50	0,62	17,40
2022	43,71	2,21	1,11	38,77	0,34	2,42	0,42	0,62	18,05
2023	37,80	2,79	1,19	40,28	0,40	2,51	0,39	0,54	17,33
2024	36,04	4,02	1,32	39,88	0,43	3,05	0,47	0,70	17,59
$R_{\min}^* p_{adj} < 0,05$	—	—	0,21- 0,32	1,74- 1,93	0,08- 0,15	0,29-0,41	0,11-0,19	0,10-0,16	0,88- 1,09
HP_{05}	—	—	0,27	1,86	0,12	0,34	0,13	0,14	1,00

*Тест Т'юкі ($R_{\min}$ for $p_{adj} < 0,05$).

Таблиця 4

**Основні індикатори сидеральної якості корневих решток редьки олійної
за весняного строку її сівби, 2014–2024 рр.**

Рік	Відношення									
	C(OB)/ N (ЗВА)		C(OB)/P		C(OB)/S		Л/ЗВА		Л/Р	
	$\bar{x}$	SD*	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD
2014	30,64	2,11	126,52	11,70	75,42	9,37	9,73	0,78	40,16	3,64
2015	28,69	2,40	92,59	6,96	62,68	5,41	10,10	1,06	32,59	2,75
2016	29,29	1,96	71,36	3,90	49,06	8,51	9,78	0,78	23,84	1,51
2017	24,59	1,97	66,63	2,95	46,42	1,43	9,39	0,82	25,45	1,21
2018	26,38	6,59	78,12	2,63	51,74	10,16	9,33	2,36	27,63	0,91
2019	33,12	1,40	101,14	5,61	69,30	7,24	10,52	0,45	32,14	2,17
2020	32,85	5,38	89,07	5,21	69,10	12,30	10,34	2,21	28,02	1,67
2021	36,52	7,77	132,24	7,41	61,85	6,93	11,89	2,42	43,03	2,56
2022	34,93	2,50	114,03	7,13	62,53	9,18	11,63	0,66	37,97	3,77
2023	33,85	5,13	100,70	5,32	74,59	10,32	10,73	1,93	31,93	2,15
2024	30,21	3,39	92,74	8,12	56,97	8,56	10,49	1,27	32,21	2,98
HIP ₀₅	2,18	–	7,41	–	7,96	–	0,87	–	1,67	–

Рік	Акумуляція в корневих рештках, кг/га										Вихід глюкозино- латів, моль/га	
	N		P		K		Ca		S		$\bar{x}$	SD
	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD		
2014	34,69	2,46	8,40	3,17	56,37	12,73	13,28	0,71	14,09	0,72	44,61	3,25
2015	25,84	3,76	8,01	1,75	51,51	4,41	7,46	0,57	11,83	0,67	29,45	2,19
2016	18,09	2,46	7,43	1,30	49,28	5,60	7,16	0,59	10,8	0,55	25,91	2,58
2017	17,14	3,61	6,32	2,09	48,45	8,85	5,81	0,48	9,08	0,79	21,35	3,92
2018	12,23	2,90	4,13	0,67	24,38	3,69	3,97	0,37	6,24	0,54	16,97	2,55
2019	34,69	3,42	11,36	2,19	51,88	12,93	11,67	0,65	16,58	0,71	48,6	3,08
2020	31,48	4,99	11,61	2,00	89,78	8,10	10,58	0,59	14,96	0,63	48,56	3,41
2021	19,22	4,36	5,31	0,61	39,16	2,18	9,15	0,58	11,35	0,77	31,84	2,29
2022	17,76	2,19	5,44	2,31	38,72	4,14	6,72	0,55	9,92	0,55	28,88	2,09
2023	17,26	1,23	5,80	1,51	36,40	4,29	5,66	0,52	7,83	0,72	25,13	2,14
2024	16,24	2,89	5,29	1,89	37,52	8,12	5,78	0,51	8,61	0,85	21,64	2,05
HIP ₀₅	7,18	–	4,91	–	9,19		3,22	–	2,55	–	0,30	–

* – стандартне відхилення.

При цьому середньо багаторічний вміст целюлози був у значенні 38,06% ($C_v = 8,70\%$), а геміцелюлози – 3,28% ($C_v = 25,55\%$). У структурі клітковини переважала нейтрально дитергентна клітковина – 54,0% (при міжрічному $C_v = 7,25\%$), співвідношенні НДК/КДК – 1,07. Наявність високого вмісту клітковини та целюлозопохідних структур на фоні високого вмісту лігніну (13,30% при $C_v = 8,40\%$) вказує на повільні темпи розкладу корневих решток редьки олійної в цілому, особливо на стадії розкладання лігнізованих структур рослинних тканин сидератів, яка є завершальною у цьому циклі [14, с. 88–90]. Це ж підтверджується результатами співвідношенням вмісту лігніну (Л) до загального вмісту азоту (Л/ЗВА) та фосфору (Л/Р) (табл. 4) – на рівні більше 10 одиниць для першого та більше 30 одиниць для другого показника, що створює передумови для повільного

розкладення клітковинно-целюлозного каркасу тканин кореневих решток редьки олійної [21, с. 4–6].

Важливим з позиції біохімічної цінності сидеральної маси є її зольність, яка по суті визначає потенціал джерела макро- та мікроелементів при розкладенні біомаси у ґрунті. Для корневих решток редьки олійної визначено середньо багаторічний зольності у значенні 6,86% (при міжрічному $C_v = 13,53\%$). За цим показником коренева маса редьки олійної на фазу цвітіння за значенням показника зольності була на рівні таких поширених сидератів як гірчиця біла та ріпак озимий [9, с. 68–70]. При цьому слід відмітити, що кореневі рештки редьки олійної є цінним джерелом фосфору (середньобагаторічний вміст 0,43% на абсолютно суху речовину), калію (2,87%), кальцію (0,46%) та сірки (0,66%) (табл. 3). За рахунок такого вмісту та на підставі визначених рівнів біопродуктивності та вмісту азотистих сполук у середньорічному вимірі кореневі рештки редьки олійної накопичували за весняного строку сівби та відповідно червневого періоду сидерального їх застосування до 23 кг/га азоту (з максимумом до 35 кг/га), 8 кг/га фосфору (з максимумом до 12 кг/га), 48 кг/га калію (з максимумом до 57 кг/га), 8 кг/га кальцію (з максимумом до 14 кг/га), 11 кг/га сірки (з максимумом до 17 кг/га). Такі значення доводять синергічну цінність корневих решток редьки олійної у додатку до основного джерела компонентів надземної маси та позитивно узгоджуються із рядом висновків [14, с. 1188–1189; 29, с. 28–30; 30, с. 2379–2380].

Окремо слід відмітити високий вміст глюкозинолатів у корневих рештках редьки олійної 18,07 мкмоль/г абсолютно сухої речовини, що позитивно корелює з встановленим високим вмістом сірки [18, с. 7–9] та забезпечує високий біофумігаційний потенціал за показником виходу глюкозинолатів на середньо багаторічному рівні 31,17 моль/га з досяжним потенціалом до 50 моль/га. Враховуючи ряд досліджень [18, с. 10; 19, с. 805; 31, с. 313] такі показники дозволяють рекомендувати редьку олійну як одного із основних компонентів у технологіях біофумігації ґрунту різного технологічного складу на ґрунтах із середнім потенціалом ґрунтової родючості без додаткового застосування добрив. Наявність вже відміченого високого вмісту азотистих сполук та інтенсивного розвитку кореневої системи за короткий період формування надземної маси, що за обома позиціями підтверджена і в інших дослідженнях [32, с. 2–3; 33, с. 158–159] – такий варіант біофумігації носитиме не лише фітосанітарний та протисегетальний характер, але й забезпечить ціленаправлений ефект ґрунтореабілітації та зниження загальної фітотоксичності ґрунту.

Висновки і перспективи подальших досліджень. На підставі всебічного аналізу отриманих даних встановлено, що варіант весняного строку сівби редьки олійної на сидерат за умов нестійкого зволоження на ґрунтах із середнім потенціалом ґрунтових умов родючості забезпечує отримання до 24 т/га надземної та 8,5 т/га кореневої біомаси, що у еквіваленті сухої речовини забезпечує 4,83 т/га загальної сухої біомаси.

Доведена сидеральна цінність корневих решток редьки олійної як додатковий чинник загального сповільнення темпів ґрунтового розкладення сидеральної маси, та як додаткове джерело макро- та мікроелементів.

Як елемент біоорганічних технологій удобрення, за вирощування сільськогосподарських культур не хрестоцвітвого виду, кореневі рештки редьки олійної з агроценозів сидерального типу весняного строку сівби у середньо багаторічному вимірі забезпечують надходження у ґрунт 23–35 кг/га азоту, 8–12 кг/га фосфору, 48–57 кг/га калію, 8–14 кг/га кальцію та 11–17 кг/га сірки при встановленому біофумігаційному потенціалі за виходом глюкозинолатів на рівні 31,17 моль/га.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. 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.
2. 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.
3. Hudek C., Putinica C., Otten W., De Baets S. Functional root trait-based classification of cover crops to improve soil physical properties. *European Journal of Soil Science* 2022. Vol. 73. №1. e13147.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Lei B., Wang J., Yao H. Ecological and environmental benefits of planting green manure in paddy fields. *Agriculture*. 2022. Vol. 12. №2. 223.
9. 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.
10. 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.
11. Tsytsiura Y. Evaluation of Ecological Adaptability of Oilseed Radish (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.) Biopotential Realization in the System of Criteria for Multi-Service Cover Crop. *Journal of Ecological Engineering*. 2024. Vol. 25. Iss. 7. P. 265–285.
12. 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 Crops Research*. 2021. Vol. 266. 108146.
13. 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.
14. 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.
15. Hansen V., Müller-Stöver D., Magid J. 2022. Green manure crops for low fertility soils URL: https://orprints.org/id/eprint/37832/1/poster_Veronika%20Hansen.pdf (date of application 16.06.2025).
16. 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. № 31(2). P. 219–243.
17. Jansen M.D. An evaluation of tillage radish (*Raphanus sativus* L.) to alleviate post-construction soil compaction and germination potential under varying environmental conditions. A thesis submitted to the graduate faculty in partial fulfillment

of the requirements for the degree of Master of science. Iowa State University Ames, Iowa. 2021. 85 p.

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

19. Van Dam N.M., Witjes L., Svatoš A. Interactions between aboveground and belowground induction of glucosinolates in two wild *Brassica* species. *New Phytologist*. 2004. Vol. 161. P. 801–810.

20. Yi G., Lim S., Chae W.B., Park J.E., Park H.R., Lee E.J., Huh J.H. Root Glucosinolate Profiles for Screening of Radish (*Raphanus sativus* L.) Genetic Resources. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 2016. Vol. 64. №1. P. 61–70.

21. Nguyen V.P.T., Stewart J., Lopez M., Ioannou I., Allais F.. Glucosinolates: Natural Occurrence, Biosynthesis, Accessibility, Isolation, Structures, and Biological Activities. *Molecules* 2020. Vol. 25. №19. 4537.

22. Цицюра Я.Г., Ткачук О.П. Патент на корисну модель України. Спосіб біологічного контролю сеgetальної деградації ґрунтів у сівозміні. № 159011. Публікація відомостей 16.04.2025, Бюл. 16. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1851769/> (дата звернення 16.06.2025)

23. Цицюра Я.Г. Ґрунтореабілітаційний потенціал редьки олійної за її сидерального використання з позиції відновлення базових агрофізичних властивостей. *Український журнал природничих наук*. 2024. № 10. С. 185–196.

24. Цицюра Я.Г. Оцінка закономірностей формування біомаси редьки олійної з позиції її сидерального різнострокового використання. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*. 2024. Вип. 3 (44). С. 53–61.

25. Test Guidelines for the conduct of tests for distinctness, uniformity and stability of Fodder Radish (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.). International union for the protection of new varieties of plants. UPOV. Geneva, 2017. 23 p.

26. Bublitz T.A., Kemper R., Müller P., Kautz T., Döring T.F., Athmann M. Relating Profile Wall Root-Length Density Estimates to Monolith Root-Length Density Measurements of Cover Crops. *Agronomy*. 2022. Vol. 12. 48.

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

28. Kemper R. Root growth of sole and mixed cover crops in organic farming. Dissertation for the attainment of the degree Doctor of Agricultural Sciences. Institute of Crop Science and Resource Conservation. Department of Agroecology and Organic Farming. Bonn. 2024. 195 p.

29. Цицюра Я.Г., Неїлик М.М., Дідур І.М., Поліщук М.І. Сидерація як базова складова біологізації сучасних систем землеробства. Монографія. Вінниця: Видавець ТОВ «Друк», 2022. 770 с.

30. Karssemeijer P.N., de Kreek K.A., Gols R., Neequaye M., Reichelt M., Gershenzon J., van Loon J.J.A., Dicke M. Specialist root herbivore modulates plant transcriptome and downregulates defensive secondary metabolites in a brassicaceous plant. *New Phytologist*. 2022. Vol. 235, №6. P. 2378–2392.

31. Antonious G.F., Bomford M., Vincelli P. Screening Brassica species for glucosinolate content. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*. 2009. Vol. 44. №3. P. 311–316.

32. Hirte J., Leifeld J., Abiven S., Oberholzer H.-R., Hammelehle A., Mayer J.. Overestimation of Crop Root Biomass in Field Experiments Due to Extraneous Organic Matter. *Frontiers Plant Science* 2017. Vol. 8. 284.

33. Kemper R., Döring T.F., Legner N., Meinen C., Athmann M.. Oil radish, winter rye and crimson clover: root and shoot performance in cover crop mixtures. *Plant and Soil*. Vol. 506. №1. P. 157–172.