

КОРЕНЕВІ РЕШТКИ РЕДЬКИ ОЛІЙНОЇ ЯК ДОДАТКОВИЙ ЕФЕКТИВНИЙ КОМПОНЕНТ ПРОМІЖНОГО СИДЕРАЛЬНОГО УДОБРЕННЯ

ЦИЦЮРА Я.Г. – кандидат сільськогосподарських наук, доцент

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

Вінницький національний аграрний університет

Постановка проблеми. Системи удобрення у світовій практиці агротехнологій поступово зміщуються у сторону формування біоорганічних їх варіантів за широкого спектру використання біодобров, сидератів та їх поєднання [1]. За цих умов залишаються проблеми поєднання такого біоорганічного варіанту удобрення із системою обробітку ґрунту, строками сівби основних сільськогосподарських культур, добору відповідного виду сидерату з огляду на адаптивність, біопродуктивність та сидеральний потенціал [2]. Оптимізація комбінування даних чинників дозволяє істотно підвищити ґрунтореабілітаційний потенціал варіантів біоорганічного удобрення і, зокрема, сидеральних її видів [3].

Разом із тим, сидеральний потенціал різних видів рослин слід оцінювати як з позиції формування надземної біомаси, так і з позиції формування кореневої її частки, оскільки коренева біомаса є невід'ємною частиною сидеральної ефективності рослин, формуючи відповідний рівень біоорганічного наповнення кореневмісного шару ґрунту та ґрунтового профілю в цілому [4].

З огляду на вище викладене, актуальним питанням є дослідження закономірностей формування кореневих систем сидеральних культур та рівнів їх біопродуктивності для оцінки сидерального біопотенціалу конкретного виду рослин та добору тактики їх строкового використання у системі біоорганічних технологій удобрення [5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Коренева система у сидеральних культур відіграє важливу роль у забезпеченні як основних ростових процесів надземної біомаси, так і у формуванні впливу на ґрунтовий профіль за рахунок безпосередньої взаємодії з агрофізичним комплексом ґрунту як субстрату [6]. Встановлено, що за рахунок ростових галузень, інтенсивного проникнення у вертикальному напрямку та відповідних кореневих виділень коренева біомаса активно впливає на формування основних агрофізичних властивостей ґрунту, забезпечує додаткове надходження органіки у ґрунт та сприяє оптимізації ґрунтового живлення за рахунок іммобілізації основних хімічних компонентів з кореневої біомаси у процесі її розкладу.

Визначено [7], що ефективність процесів засвоєння компонентів кореневої біомаси у ґрунті та забезпечення позитивних процесів її гуміфікації залежить від біохімічного її складу, виду рослин та строків сидерації, які в свою чергу мають тісний зв'язок з ґрунтово-кліматичним потенціалом території з огляду на регулятивний вплив на швидкість та етапність розкладення як надземної, так і кореневої біомаси у профілі ґрунту [8].

Повідомляється також [9], що різні види рослин сидератів мають власні специфічні особливості у характері

формування кореневих систем, темпів їх росту та формування біомаси у різних горизонтах ґрунтового профілю. З цієї позиції хрестоцвіті види рослин широко застосовуються у практиці сидерації, такі як гірчиця біла, ріпак ярий та озимий, суріпиця яра [3, 10]. Вказані культури володіють цілим комплексом позитивних властивостей з позиції їх сидерального використання у варіантах біоорганічних систем удобрення [11]. Проте, відмічається, що вивченість особливостей формування та використання саме кореневих решток є питанням дискусійним, оскільки основна увага досліджень зосереджена перш за все на особливостях надземної продуктивності як основного джерела сидеральної маси [12, 13]. У цьому плані редька олійна, володіючи цілим комплексом позитивних ознак і властивостей, які вирізняють її як цінну і багатопрофільну сидеральну культуру [14–15] також потребує відповідних досліджень та узагальнень з позиції сидеральної цінності кореневих решток та їх ролі у оптимізації ґрунтового живлення за систематичного застосування різнострокових варіантів сидерації.

Мета. З огляду на вище наведені аргументи, метою тривалого циклу оцінок було дослідження формування кореневої системи редьки олійної (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.) з позиції біохімічного портфолію та біоорганічного потенціалу як компоненту удобрення на сірих лісових ґрунтах 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. Досліди було закладено та проведено у період 2014–2024 рр. в умовах дослідного поля Вінницького національного аграрного університету (N 49°11'31", E 28°22'16") на сірих лісових ґрунтах за таких середніх агрохімічних параметрів: 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, $P_{H_{KCl}}$ 5,8.

Для досліджень було обрано поширений в регіоні сорт редьки олійної Журавка кормово-сидерального напрямку використання. Застосовано сидеральний варіант припосівного конструювання з нормою висіву 2,5 млн. схожих насінин на га при міжрядді 15 см на фоні без удобрення. Сівбу проводили у варіанті проміжної літньої сидерації у другій-третьій декаді липня з досягненням фази цвітіння (BBCH 64–67) – оптимального варіанту сидерації – на другу-третью декаду жовтня. Облікова площа дослідних ділянок 25 м² за рендомізованої системи чотирьохразових повторень.

Ідентифікацію фенологічного розвитку проведено у відповідності до міжнародної шкали періодизації розвитку ВВСН [16]. Для оцінки сформованої кореневої біомаси було застосовано спосіб монолітів з врахуванням ряду методичних рекомендацій [17, 18].

Моноліти формували з вертикального профілю ґрунту з кроком в 10 см. В аналіз було включено два рядки рослин із глибиною охоплення до 10 рослин у чотирьохразовому повторенні. Було використано металічні коробки із загостреними краями із відкритим верхом (совковий тип, товщина стінок 3 мм) розміром 30 см×33,3 см×10 см (обліковий об'єм ~0.01 м³). Для обрізки монолітного прошарку по зовнішній фронтальній стінці застосовували вертикальну загострену металічну пластину розміром 10 см×34 см×0.3 см. Це дозволило ущільнювати стінки моноліта. Кожний відібраний мікромоноліт маркувався та пакувався у герметичні пакети та зберігався при температурі 5 °С з послідовним промиванням водою для вагового та структурного аналізу. Для промивної сепарації коренів застосовувалась колонка решіт (сита лабораторні із дрітної сітки 4.0 мм, 2.0 мм, 1.0 мм, 0.5 мм та 0.25 мм).

Вміст сухої речовини в кореневій масі відмитій з монолітів визначали методом сушіння до постійної ваги при 105 °С та послідовного озолення при 550 °С [19]. Вихід кореневої біомаси (ВКБ) розраховували відповідно до базових рекомендацій [20].

Біохімічний аналіз кореневої біомаси редьки олійної проводили на абсолютно суху речовину, застосовуючи стандартні протоколи визначення базових показників детально і повно описаних у нашій системній публікації [14].

Для аналізу гідротермічних умов було використано стандартні показники гідротермічного режиму територій: 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: ГТК > 1,6 – надмірна вологість, ГТК 1,3–1,6 – волога, ГТК 1,0–1,3 – помірно суха, ГТК 0,7–1,0 – суха, ГТК 0,4–0,7 – дуже суха.

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

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

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

де: K_p – коефіцієнт зволоження; P – сума опадів за аналізований період, мм; E – випаровуваність за аналізований період, мм, яку розраховували за рівнянням 4 (ступінь вологості за K_z : $K_z > 1,0$ – надмірний, K_z близький до 1 – оптимальний, $K_z = 1,0$ –0,6 – нестабільний, $K_z = 0,6$ –0,3 – недостатній).

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

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

Оцінка гідротермічних умов за проміжного (літнього) варіанту сидерації редьки олійної наведено у таблиці 1.

Для обробки результатів досліджень було застосовано базові показники варіаційної статистики (стандартне відхилення (SD), коефіцієнт варіації (C_v)) на рівнях $p < 0.05$ та $p < 0.01$ за використанні Statistica 10 (StatSoft – Dell Software Company, USA). Для ідентифікації істотності різниці між показниками примінено дисперсійний аналіз з визначенням найменшої істотної різниці та системного тесту Т'юкі для статистичного рівня значущості $p < 0.05$.

Результати досліджень. Результатами тривалої оцінки морфологічного та вагового розвитку кореневої системи встановлено, що для редьки олійної характерним є формування інтенсивно розвиненої потовщеної стрижневої частини з діаметром від 4,0 до 8,5 мм та можливим коливанням залежно від агротехнологічних параметрів конструювання її агроценозу від 2,5 до 14,8 мм [21]. При цьому з позиції морфометрії стрижневої частини в межах

Таблиця 1

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

Рік	Сума опадів, мм (VII-X)	t_{aver} °С (VII-X)	Місяці											
			VII			VIII			IX			X		
			ГТК	I_{DM}	K_z	ГТК	I_{DM}	K_z	ГТК	I_{DM}	K_z	ГТК	I_{DM}	K_z
2014	250.8	15.4	1.312	32.7	0.77	1.049	26.0	0.51	1.252	25.7	0.56	1.770	35.8	0.93
2015	160.8	16.6	0.321	8.1	0.14	0.124	3.1	0.05	1.184	26.8	0.63	3.039	49.4	1.25
2016	212.7	15.6	1.056	26.5	0.55	0.898	22.0	0.43	0.014	2.5	0.05	0.548	63.4	2.45
2017	318.0	16.0	1.524	37.5	0.72	0.819	20.7	0.38	3.100	61.2	1.57	1.065	30.0	1.26
2018	273.4	16.4	2.158	53.4	1.63	0.585	14.6	0.30	1.378	27.2	0.71	0.873	27.6	0.95
2019	161.7	16.0	1.013	24.4	0.56	0.237	5.9	0.11	0.994	20.7	0.42	0.383	27.4	0.93
2020	245.4	17.6	0.589	14.7	0.31	0.527	13.2	0.22	0.859	27.5	0.54	2.544	60.6	3.05
2021	176.9	15.4	0.782	20.1	0.45	1.459	35.7	0.91	0.705	17.6	0.51	0.000	1.7	0.04
2022	436.6	16.0	0.900	22.4	0.58	1.712	43.1	1.06	4.960	98.1	2.60	3.167	51.4	1.50
2023	247.1	18.3	1.414	35.8	0.82	0.652	16.9	0.36	1.015	23.4	0.63	1.025	29.9	0.93
2024	219.8	19.6	1.190	31.1	0.66	0.771	19.8	0.41	0.445	10.6	0.22	1.173	30.5	1.06

* середня середньодобова температура (°С).

встановленої площі живлення рослин редьки олійної у варіанті власне сидерального використання (2,5 млн. схожих насінин/га) відмічено висока ступінь варіювання показника з максимальним значенням до 35,7% за значенням коефіцієнту варіації. Така особливість формує виражені варіаційні ряди у морфометричному розвитку кореневої системи редьки олійної у межах облікових площ на 1 м² (рис. 1–2).



Рис. 1. Варіаційний ряд розвитку стрижневої частини кореневої системи редьки олійної за її сидерального проміжного (літнього) використання, 2024 рік

З позиції біопродуктивності коренева система редьки олійної по відношенню до обсягів формування надземної сидеральної маси за довготривалий період досліджень продемонструвала високі рівні продуктивності як у роки із сприятливими гідротермічними умовами, так і у роки з вираженими процесами аридизації – інтенсивне наростання середньодобових температур на фоні дефіциту вологозабезпечення (табл. 1).



Рис. 2. Стрижневий корінь редьки олійної з елементами первинного галузнення послідовно відібраний із середнього рядка облікової ділянки 1 м² для двох несуміжних повторень за літнього строку сівби на фенофазу цвітіння (ВВСН 64–67), 2024 р.

Враховуючи рівень біопродуктивності таких традиційних хрестоцвітних сидеральних культур як гірчиця біла та ріпак ярий з рівнем сформованої біомаси коренів у варіантах літнього сидерального їх використання

Таблиця 2

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

Показники біопро- дуктивності	Період оцінки, роки											НІР _{0,5}
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	
Сформована над- земна біомаса, т/га	22,21	9,49	21,05	23,79	23,12	10,11	11,29	16,22	24,77	21,39	9,77	1,24
Сформована над- земна біомаса у сухій речовині, т/га	3,37	1,66	3,36	3,39	3,45	1,73	1,82	2,73	3,33	3,37	1,55	0,37
Сформована коре- нева біомаса, т/га	6,59	1,39	5,77	7,21	5,52	3,58	3,09	6,49	8,03	7,33	2,84	0,65
Сформована коре- нева біомаса у сухій речовині, т/га	1,46	0,35	1,33	1,52	1,29	0,72	0,70	1,51	1,76	1,72	0,68	0,14
Коефіцієнт продук- тивності кореневої системи (у сухій речовині)	2,31	4,75	2,52	2,23	2,68	2,40	2,59	1,80	1,89	1,95	2,28	0,37
Частка кореневих решток у сформова- ній біомасі рослин (у сухій речовині)	43,36	21,05	39,68	44,77	37,29	41,60	38,60	55,44	52,89	51,17	30,49	3,44

у сухій речовині на рівні 0,8–2,0 т/га [7, 10, 14, 21] – слід віднести до високопродуктивних хрестоцвітих сидеральних культур з достатнім рівнем біологічної адаптивності. Це узгоджується із результатами середньобаторічних рівнів біопродуктивності кореневої системи за період досліджень у сирій масі 5,26 т/га та 1,19 т/га у сухій речовині при коефіцієнті продуктивності кореневої системи 2,49 та частці коренів у загальній біомасі рослин у значенні 41,49%.

Підтверджено цінність корневих решток редьки олійної з позиції компоненту біоорганічного удобрення за результатами оцінки їх біохімічного складу (табл. 3). Доведено, що з позиції загальної біохімічної оцінки кореневі рештки редьки олійної належать до відносно високо протеїнової групи рослинного сидерального матеріалу із середньобаторічним вмістом сирого протеїну 9,98% на абсолютно суху речовину за загального середньо багаторічного вмісту азоту 1,6% на абсолютно

суху речовину. При цьому встановлено зниження даного показника за загального зниження кількості опадів на фоні зростання середньодобової температури. До прикладу для найбільш посушливих років (2015, 2019 та 2021 (табл. 1)) загальний вміст сирого протеїну, а отже і загальний вміст азоту був нижчим на 2–5% у співставленні до років із достатнім волого забезпеченням та помірними температурами. Очевидно, що це пов'язано з характером синтезу головних компонентів біохімічної структури надземних та підземних і органів і зокрема відмічену [3] особливість реутилізації азотистих сполук з корневих систем за умов юридизації періоду активного росту і розвитку, відмічену в цілому для хрестоцвітих видів рослин [23].

За рахунок такого рівня концентрації азоту з огляду на біопродуктивність кореневої маси у ґрунт з корневими рештками поступає від 10 до 35 кг/га азоту за середньобаторічного значення 19,44 кг/га (табл. 4).

Таблиця 3

Біохімічний склад корневих решток редьки олійної за проміжного (літнього) сидерального її використання (у % на абсолютно суху речовину), 2014–2024 рр.

Рік	Органічна суха речо- вина (ОР)	Сирий про- теїн (СП)	Сирий жир (СЖ)	Сира кліт- ковина (СК)	Сира зола(СЗ)	Нейтрально дигергентна клітковина (НДК)	Кислотно- дигергентна клітковина (КДК)		Лігнін (Л)
2014	22,17	10,31	2,21	36,93	4,10	43,58	39,88		9,62
2015	25,18	6,44	2,91	42,09	5,59	47,78	43,84		10,21
2016	23,12	8,19	2,27	36,77	4,98	45,52	40,19		9,42
2017	21,08	11,88	2,04	36,35	7,77	44,59	39,31		9,06
2018	23,29	9,69	2,45	35,48	7,02	43,61	38,55		9,22
2019	20,15	8,56	2,78	36,47	4,88	45,72	41,92		10,08
2020	22,68	11,56	2,11	35,29	5,83	45,78	40,18		9,65
2021	23,32	8,94	2,37	35,81	4,94	45,85	38,89		9,79
2022	21,91	12,38	1,91	34,68	5,41	44,41	39,92		10,22
2023	23,52	10,13	2,05	36,07	6,35	44,88	41,19		9,79
2024	23,96	11,68	1,88	38,79	5,27	46,55	42,55		11,07
R _{min} p _{adj} < 0.05	0,79- 0,97	0,97-1,22	0,27-0,44	1,23- 1,44	0,78-0/92	0,82- 1,05	0,85- 1,03		0,57- 0,72
HIP ₀₅	0,88	1,17	0,39	1,38	0,96	1,01	0,91		0,68
Рік	Целю-лоза	Геміце- люлоза	Загальний вміст азоту (ЗВА)	Органічний вуглець(ОВ)	Загальний вміст фос- фору (Р)	Загальний вміст калію (К)	Вміст кальцію (Са)	Загальний вміст сірки (S)	Вміст глюкози- нолатів мкмоль/г (ГКЗ)
2014	30,26	3,70	1,65	41,88	0,38	2,04	0,31	0,53	16,26
2015	33,63	3,94	1,03	41,96	0,44	3,01	0,41	0,77	15,74
2016	30,77	5,33	1,31	41,73	0,35	2,27	0,29	0,51	15,87
2017	30,25	5,28	1,90	40,38	0,32	2,15	0,31	0,56	18,74
2018	29,33	5,06	1,55	41,55	0,42	2,94	0,27	0,67	19,56
2019	31,84	3,80	1,37	41,84	0,46	3,22	0,62	0,70	18,17
2020	30,53	5,60	1,85	39,48	0,32	1,97	0,41	0,59	17,16
2021	29,10	6,96	1,43	41,03	0,37	2,12	0,37	0,72	18,78
2022	29,70	4,49	1,98	38,54	0,40	1,88	0,22	0,42	15,26
2023	31,40	3,69	1,62	41,38	0,35	2,34	0,29	0,64	18,00
2024	31,48	4,00	1,87	41,55	0,31	2,05	0,24	0,79	19,11
R _{min} p _{adj} < 0.05	—	—	0,18-0,31	0,52- 0,61	0,11- 0,16	0,35-0,44	0,08-0,12	0,08-0,13	1,18- 1,29
HIP ₀₅	—	—	0,25	0,56	0,14	0,40	0,10	0,11	1,23

*Тест Т'юкі ($R_{\min}$ for $p_{\text{adj}} < 0.05$).

Потенційно ж редька олійна здатна накопичувати до 45–65 кг/га азоту, саме за рахунок кореневих решток [11, 14].

На фоні високого вмісту органічного вуглецю С (ОВ) 41,03% показник співвідношення С/Н (таблиця 4) був у середньому на рівні 25,64.

З позиції того, що дане співвідношення визначає інтенсивність розкладу рослинних тканин у ґрунті і є оптимальним у інтервалі 25–30 для умов сидерального їх застосування [22] та беручи до уваги інтервальний ряд, отриманий нами у різні роки оцінок у значенні 19,46–40,74 – слід очікувати істотно нижчих темпів розкладу кореневих решток редьки олійної у співставленні до надземної її біомаси, для якої вказаний показник був в інтервалі від 12–21 [14].

З врахуванням цього кореневі рештки редьки олійної можна розглядати як оптимізуючий чинник стабілізації темпів розкладення надземної сидеральної біомаси у ґрунті, вирівнюючи середовище мінералізації по рівня співвідношення у середньому вище 20 одиниць, що позитивно узгоджується із рядом досліджень [11, 20, 22].

Високий вміст сирого жиру – у середньому за період досліджень 2,27% на абсолютно суху речовину вказує на

особливість розкладу корневих решток редьки олійної з наявною стадією так званого ослизнення та супроводження процесу розкладу гідролітичним розщепленням рослинних жирів, що формує ефект активного оводнення анатомічних структур кореня (рис. 3). За рахунок цього відмічено при розкладенні корневих решток редьки олійної наявність «швидкої» стадії розкладення у перших 20 діб такого процесу у ґрунті за умов достатнього зволоження з послідовним переходом на більш повільні темпи розкладення.

Позитивним з позиції сидерального потенціалу корневих решток редьки олійної є висока зольність. У середньому за період оцінок на рівні 5,65% (табл. 3) на абсолютно суху речовину, що прогнозовано вказує на відповідні рівні вмісту основних макро- та мікроелементів [10] та підтверджується результатами розрахунку акумуляції основних елементів. Так, у середньобагаторічному вимірі кореневі рештки редьки олійної здатні акумулювати (табл. 4) від 1,5 до 7,0 кг/га фосфору, від 11 до 40 кг/га калію, від 1,4 до 5,6 кг/га кальцію та від 2,7 до 11 кг/га сірки. У співставленні до корневих решток інших хрестоцвітих видів рослин таких як гірчиця біла

Таблиця 4

Головні індикатори сидеральної якості корневих решток редьки олійної за проміжного (літнього) сидерального її використання, 2014–2024 рр.

Рік	Відношення									
	C(OB)/ N (ЗБА)		C(OB)/P		C(OB)/S		Л/ЗБА		Л/Р	
	$\bar{x}$	SD*	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD
2014	25,38	4,47	110,21	5,78	79,02	5,80	5,83	1,02	25,32	3,59
2015	40,74	7,01	95,36	3,80	54,49	6,85	9,91	1,94	23,20	1,79
2016	31,85	1,38	119,23	8,08	81,82	9,54	7,19	0,79	26,91	2,49
2017	21,25	1,65	126,19	5,44	72,11	11,46	4,77	0,55	28,31	2,23
2018	26,81	3,74	98,93	2,45	62,01	9,35	5,95	0,77	21,95	0,70
2019	30,54	2,28	90,96	2,07	59,77	6,48	7,36	0,75	21,91	0,88
2020	21,34	1,10	123,38	30,61	66,92	6,46	5,22	0,31	30,16	11,95
2021	28,69	3,07	110,89	3,07	56,99	5,54	6,85	1,00	26,46	1,49
2022	19,46	3,35	96,35	5,59	91,76	19,10	5,16	1,15	25,55	2,32
2023	25,54	2,52	118,23	9,14	64,66	7,21	6,04	0,66	27,97	3,83
2024	22,22	3,55	134,03	5,89	52,59	8,59	5,92	1,09	35,71	2,19
HIP ₀₅	2,79	—	4,28	—	8,39	—	0,64	—	2,05	—

Рік	Акумуляція в корневих рештках, кг/га										Вихід глюкози- но-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	24,09	2,40	5,55	1,37	29,78	7,14	4,53	0,67	7,74	0,65	23,74	2,18
2015	3,61	0,21	1,54	0,40	10,54	1,65	1,44	0,28	2,70	0,44	5,51	1,09
2016	17,42	1,72	4,66	0,86	30,19	3,46	3,86	0,39	6,78	0,62	21,11	1,58
2017	28,88	2,38	4,86	0,98	32,68	6,34	4,71	0,57	8,51	0,75	28,48	1,92
2018	20,00	1,00	5,42	1,11	37,93	4,74	3,48	0,44	8,64	0,68	25,23	2,11
2019	9,86	1,28	3,31	0,40	23,18	2,12	4,46	0,72	5,04	0,52	13,08	0,98
2020	12,95	3,46	2,24	0,52	13,79	7,51	2,87	0,39	4,13	0,57	12,01	1,15
2021	21,59	1,69	5,59	0,94	32,01	4,41	5,59	0,88	10,87	0,81	28,36	1,29
2022	34,85	5,61	7,04	1,40	33,09	4,68	3,87	0,65	7,39	0,69	26,86	1,77
2023	27,86	3,99	6,02	2,34	40,25	8,59	4,99	0,72	11,01	0,97	30,96	1,59
2024	12,72	3,25	2,11	1,55	13,94	6,49	1,63	0,31	5,37	0,43	12,99	1,84
HIP ₀₅	9,07	—	4,55	—	11,54	—	3,84	—	3,47	—	0,30	—

* – стандартне відхилення.

та ріпак ярий і озимий [24–26] кореневі рештки редьки олійної мають переваги по вмісту калію та сірки, а також на рівні цих культур за вмістом кальцію. Це доводить агрохімічний потенціал корневих решток редьки олійної з позиції додаткового компоненту сидерального балансу в біоорганічних системах удобрення.



Рис. 3. Первинні стадії розкладення корневих решток редьки олійної у ґрунті за рахунок ослизнення та гідролізу рослинних жирів, 2024 рік

Рівень співвідношення $C(ОВ)/P$ в інтервалі 90,96–134,03 з огляду на дані [11] був у середньому меншим у співставленні до кореневої біомаси озимого ріпаку, але вищим, ніж у гірчиці білої та ярого ріпаку. Це також дозволяє віднести кореневі рештки редьки олійної до групи з інтенсивним рівнем іммобілізації фосфору. Ця властивість буде цінною на ґрунтах з низьким вмістом доступних форм фосфору.

З точки зору вмісту кальцію у корневих її рештках, редька олійна придатна для систем регулювання кислотності ґрунту через можливий потенціал його іммобілізації під час розкладання. Такий підхід позитивно корелює з висновками [27] про вплив сполук кальцію під час тривалого розкладання сидератів на ґрунтах із середнім потенціалом родючості. Виходячи з цього, сидерат з редьки олійної буде доречним на ґрунтах з низькою буферною здатністю, оскільки він сповільнить швидкість розкладання, характерну для сильно та помірно кислих ґрунтів. Це узгоджується з рядом висновків [28, 29] щодо процесів стабілізації рівня кислотності ґрунту за допомогою рослинного матеріалу з високими буферними індикаторними властивостями.

Важливим є також високий вміст сірки в корневих рештках редьки олійної та пов'язані з цим елементом процеси накопичення глюкозинолатів [30], що забезпечує високий біофумігаційний потенціал у приміненні до сучасних органічних технологій реабілітації ґрунтів та зниження біологічних ризиків агротехнологій (зниження потенційної забур'яненості, обмеження розвитку ґрунтових шкідників, нематод та паразитарної мікробіоти різного типу, зміну мікробіологічної структури ґрунтового профілю тощо).

Доведено, що рівень концентрації сірки в тканинах вище 0,50% та глюкозинолатів вище 12 мкмоль/г у сухій речовині формує достатні передумови для ініціювання ефективного процесу біофумігації під час розкладання рослинної маси [11, 30]. На підставі отриманих даних (табл.

3) щодо середнього вмісту сірки 0,63% на абсолютно суху речовину та глюкозинолатів 17,51 мкмоль/г абсолютно сухої речовини (табл. 3), кореневі рештки редьки олійної мають високий потенціал для біофумігаційних технологій позатехнологічного характеру, враховуючи природний процес локалізації корневих решток після відповідного способу використання надземної біомаси редьки олійної. Це підтверджено даними багаторічної оцінки за обсягом акумуляції глюкозинолатів у надземній біомасі 54,90 моль/га [14] та у кореневій біомасі 20,76 моль/га (табл. 4) тобто у результуючому підсумку – 75,66 моль. З огляду на узагальнення окремих дослідників [3, 30] це дозволяє класифікувати редьку олійну як високоефективний рослинний біофумігант для застосування як чисто видовому варіанті посіву, так і у варіанті різноманітних сумішок у тому числі з іншими хрестоцвітими видами рослин. Це позитивно узгоджується також із значенням співвідношення $C(ОВ)/S$ (табл. 4), яке, за даними [30] вказує на процес вивільнення сірковмісних сполук та їх похідних у процесі загальної мінералізації рослинних тканин у ґрунті та визначає швидкість такого процесу. Визначено [11], що сприятливі умови для розкладання сидератів із супутнім біофумігаційним ефектом характерні для даного співвідношення на рівні понад 120. Для корневих решток редьки олійної цей показник у середньому за період оцінок становив 67,5, тоді як показник, визначений для надземної маси в інтервалі строків сівби сидерату, становив 90,52–99,83 [14]. Це доводить властивість редьки олійної мати істотні відмінності в розкладанні надземної маси та корневих решток у бік загального подовження розкладання кореневої маси, що узгоджується з уже згаданими значеннями співвідношень $C(ОВ)/N$ та $C(ОВ)/P$ (табл. 4).

Повільні темпи розкладу у ґрунті корневих решток також позитивно корелюють із показниками вмісту сирової клітковини та її похідних (нейтрально дитергентна клітковина (НДК), кислотно-дитергентна клітковина (КДК), целюлози та геміцелюлози), а також із загальним вмістом лігніну (табл. 3–4). Відмічено [11], що вміст цих компонентів формує динаміку процесу його мінералізації з точки зору як загальної тривалості процесу, так і його важливих складових. Зокрема, відмічено [3, 5, 9], що розкладання клітковини тісно пов'язане з інтенсивністю виділення вуглекислого газу та загальною біологічною активністю ґрунту, а загальний вміст клітковини та рівень лігніфікації тканин на фоні переважаючого рівня мікробіологічної активності ґрунту є визначальним у тривалості повного розкладання рослинної біомаси в ґрунті.

Вважається [20], що рівень вмісту сирової клітковини та целюлози в рослинній масі понад 30% від сухої речовини кожного компонента окремо створює передумови для одночасного розвитку бінарної системи розкладу рослинної маси: з одного боку, це тривалий період розкладання (з рівнем деградації ґрунту, що досягає 60–80% на 70–100 добу залежно від гідротермічних умов), а з іншого – своєрідна форма стимуляції збільшення кількості мікроорганізмів у ґрунтовому профілі, що беруть участь у процесах розкладання цієї рослинної маси у певній пропорції до її кількості [11, 30]. На основі цих узагальнень, коренева маса редьки олійної за обох строків сівби мала високий вміст сирової клітковини та целюлози (табл. 3), із

середнім значенням за період досліджень вище критеріального порогу 30% (а саме 36,79%) на абсолютно суху речовину.

При цьому раніше визначений вміст сирої клітковини та целюлози в надземній масі в багаторічному вимірі [14] на рівні 24,14% та 24,43% на абсолютно-суху речовину дозволило класифікувати загальну сидеральну масу редьки олійної як значно неоднорідну за швидкістю розкладу. Виходячи з дослідження [11] встановленого співвідношення між вмістом сирої клітковини та целюлози в надземній та кореневій біомасі редьки олійної (співвідношення 1:0,62–0,67) – прогнозовано слід очікувати, що тривалість розкладання кореневої маси редьки олійної в інтервалі її сидерального використання липень-жовтень буде в 1,3–1,7 раза вищою, ніж тривалість розкладання надземної біомаси. На підставі цього, процес розкладу корневих решток редьки олійної до стадії розкладу геміцелюлозних структур прогнозується інтенсивним, подібно до розпаду надземної маси з поступовим сповільненням на стадії розкладу целюлозних структур, на відміну від інтенсивного процесу мінералізації для надземної маси. Ці висновки узгоджуються з результатами порівняння середніх значень целюлозопохідних компонентів корневих решток редьки олійної, таких як НДК, КДК та лігнін.

Зокрема, значення НДК та КДК (середнє багаторічне співвідношення 1:1,12) на рівні вище 40% на абсолютно-суху речовину.

Відзначено [20], що за наявності в тканинах лігнізованих структур, на що вказує вміст лігніну (Л) або, в нашому випадку, лігніну Класона – розкладання рослинних тканин відбувається за схемою скелетування з високими темпами розкладання нелігнізованих структур і залишенням каркасу з целюлозопохідних здерев'янілих волокнистих структур, які розкладаються на останній стадії процесу. Враховуючи диференційовану оцінку вмісту лігніну в біомасі рослин [14], кореневі рештки редьки олійної характеризуються досить високим рівнем лігнізації целюлозної та клітинної структур із середнім багаторічним визначенням вмістом лігніну 9,83% на абсолютно-суху речовину. Такий характер формування показників свідчить про високу ймовірність розкладання серцевинної частини коренеплодів редьки олійної як домінуючого компонента кореневої біомаси за сценарієм скелетування, що наочно підтверджується результатами динамічних спостережень за її станом протягом відповідних часових інтервалів після сидерального процесу, представлених на рис. 4.

Виявлені особливості також підтверджуються двома співвідношеннями, що використовуються в системі для

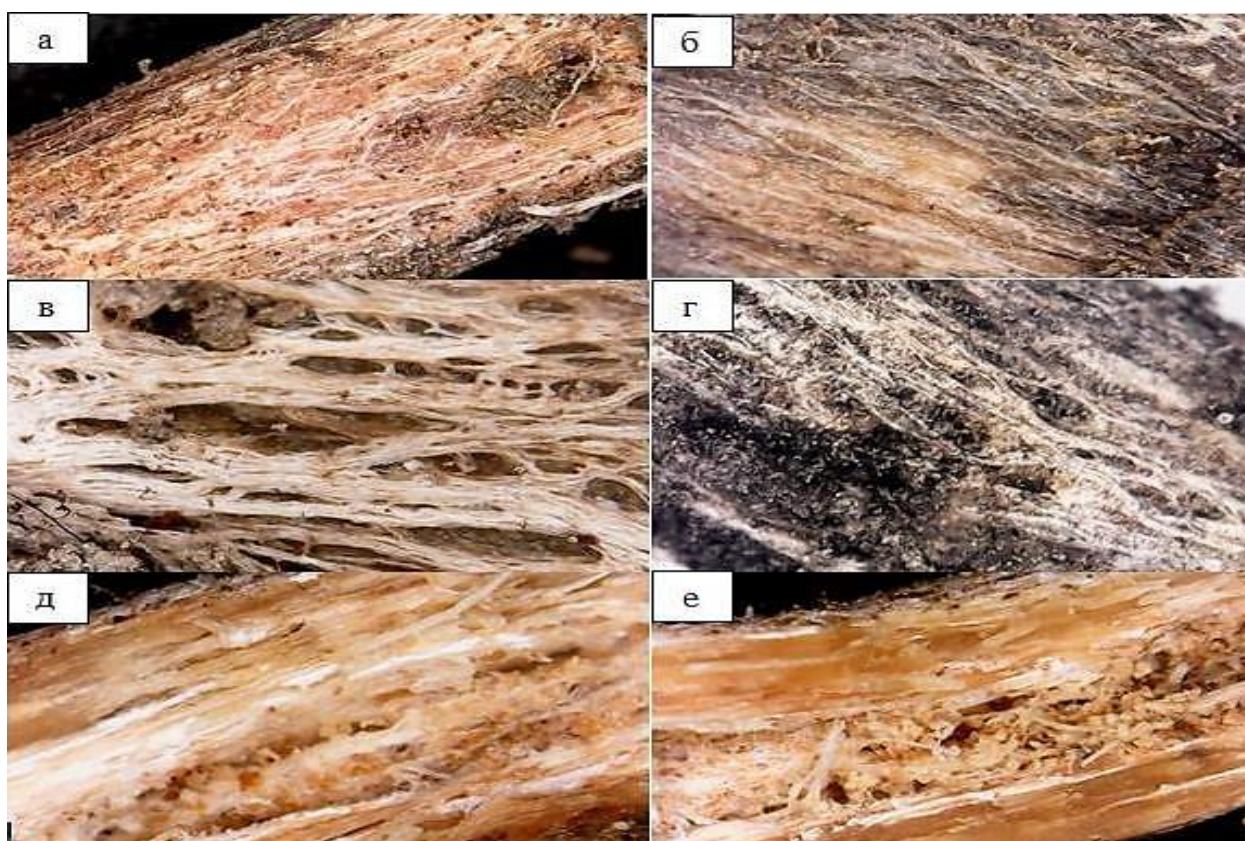


Рис. 4. Стадійність розкладу корневих решток редьки олійної з позиції іммобілізації лігнізованих структур, 2024 (а–б – початок візуалізації механічних лігнізованих структур кореневої тканини; в – процес розшарування лігнізованих і нелігнізованих структур; г – поступовий розклад лігнізованих структур на перед завершальних стадіях ґрунтового розкладу; д–е – анатомічна структура корневих решток з диференціацією на стінки та серцевину на середніх стадіях ґрунтового розкладу), 2024 рік

оцінки інтенсивності та особливостей процесу ґрунтового розкладу рослинної маси – співвідношенням Л/ЗВА та коефіцієнтом Л/Р (табл. 4). Виходячи із середніх багаторічних значень цих співвідношень для кореневих решток редьки олійної 6,38 і 26,68 відповідно – процес розкладання кореневих решток редьки олійної за сидерального використання слід віднести до процесів помірної інтенсивності з чіткою диференціацією на стадії в загальному процесі мінералізації в ґрунтовому профілі. Слід також зазначити, що порівняння отриманих маркерних показників інтенсивності сидерального засвоєння кореневої біомаси редьки олійної прогнозує значно сприятливіші умови розкладу в системі ідентичних гідротермічних параметрів ґрунтового профілю.

Висновок. Багаторічна оцінка кореневих решток редьки олійної як супутнього компонента в сидеральних технологіях довела їх цінність за літнього строку сівби з рівнем біопродуктивності в перерахунку на суху речовину 1,19 т/га.

За біохімічним складом кореневі рештки редьки олійної літнього строку сівби за основними співвідношеннями, які визначають характер та інтенсивність розкладу в ґрунті, відносяться до групи з повільними темпами мінералізації та вивільнення основних хімічних компонентів, що створює додаткові умови для оптимізованих варіантів ґрунтової іммобілізації компонентів розкладу.

Як джерело додаткового біоорганічного живлення, кореневі рештки редьки олійної у варіанті літнього строку сівби (проміжна сидерація) у середньо багаторічному вимірі забезпечують надходження у ґрунт 45–65 кг/га азоту, до 7,0 кг/га фосфору, до 40 кг/га калію, до 5,6 кг/га кальцію та до 11 кг/га сірки в перерахунку на потенційно максимально досяжний рівень, з потенціалом біофумігації за виходом глюकोзинолатів до 20,76 моль/га.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

- Honcharuk I., Tokarchuk D. Review of the European Experience of AIC Development and the Role of Green Technologies in the Modernisation of This Process. *Baltic Journal of Economic Studies*. 2024. Vol. 10. №5. P. 155–165.
- 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.
- Kucerik J., Brtnicky M., Mustafa A., Hammerschmied 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. 2001.
- Lei B., Wang J., Yao H. Ecological and Environmental Benefits of Planting Green Manure in Paddy Fields. *Agriculture*. 2022. Vol. 12. №2. 223.
- Li P., Jia L., Chen Q., Zhang H., Deng J., Lu J., Xu L., Li H., Hu F., Jiao J. Adaptive evaluation for agricultural sustainability of different fertilizer management options for a green manure-maize rotation system: Impacts on crop yield, soil biochemical properties and organic carbon fractions. *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 908, 168170.
- 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.
- Pandey A., Kumar K. The Role of Green Manure in Soil Conservation. *Vigyan Varta*. 2024. Vol. 5. №8. P. 236–241.
- Patra A., Singh R.P., Kundu M.S., Kumar G., Malkani P., Singh B.K., Choudhury S., Kundu A., Mukherjee S. Green Manuring: A Sustainable Approach for Soil Health Improvement. *Agriculture & Food E-Newsletter*. 2023. Vol. 05. № 04. P. 198–201.
- Pimentel M.L., Reis I.M.S., Romano M.L.P.C., de Castro J.S., Vildoso C.I.A., Gasparin E., Sia E.F. de, de Sousa L.S. Green manure, a sustainable strategy to improve soil quality: A case study in an oxisol from Northern Brazil. *Australian Journal of Crop Science*. 2023. Vol. 17. №6. P. 488–497.
- Rosenfeld A., Rayns F. Green manures – implications of economic and environmental benefits on rotational management. *AHDB Factsheet*. 2010. 26/10, 20 pp.
- 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. Tartu. Estonian University of Life Sciences. 2013. 164 pp.
- Gentsch N., Riechers F., Boy J., Schwenecker D., Feuerstein U., Heuermann D., Guggenberger G. Cover crops improve soil structure and change organic carbon distribution in macroaggregate fractions. *Soil*. 2024. Vol. 10. P. 139–150.
- Pimentel M.L., Reis I.M.S., Romano M.L.P.C., de Castro J.S., Vildoso C.I.A., Gasparin E., Sia E.F. de, de Sousa L.S. Green manure, a sustainable strategy to improve soil quality: A case study in an oxisol from Northern Brazil. *Australian Journal of Crop Science*. 2023. Vol. 17. №6. P. 488–497.
- 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.
- 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.
- 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.
- Bodner G., Alsalem M., Nakhforoosh A. Root System Phenotyping of Soil-Grown Plants via RGB and Hyperspectral Imaging. *Methods in Molecular Biology*. 2021. Issue 2264. P. 245–268.
- 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.
- Undersander D., Mertens D.R., Thies N. Forage analyses. Procedures. National Forage Testing Association. 1993. 139 p.
- 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.
21. Цицюра Я.Г. Особливості формування кореневої системи та кореневої біомаси редьки олійної залежно від агротехнологічних параметрів конструювання її ценозу. *Аграрні інновації*. 2024. № 24. С. 151–159.
 22. Guinet M., Voisin A.-S., Nicolardot B. Potential C and N Mineralisation of Shoot and Root Residues from Ten Grain Legume Species As Related to their Biochemical Characteristics. *World Journal of Agriculture and Soil Science*, 2023. Vol. 8. №4. WJASS.MS.ID.000691.
 23. Louvieux J., Leclercq A., Haelterman L., Hermans C. In-Field Observation of Root Growth and Nitrogen Uptake Efficiency of Winter Oilseed Rape. *Agronomy*. 2020. Vol. 10. №1. 105.
 24. Lopez G., Ahmadi S.H., Amelung W., Athmann M., Ewert F., Gaiser T., Gocke M.I., Kautz T., Postma J., Rachmilevitch S., Schaaf G., Schnepf A., Stoschus A., Watt M., Yu P., Seidel, S.J. Nutrient deficiency effects on root architecture and root-to-shoot ratio in arable crops. *Frontiers in Plant Science*. 2023. Vol. 13. 1067498.
 25. Li P., Jia L., Chen Q., Zhang H., Deng J., Lu J., Xu L., Li H., Hu F., Jiao J. Adaptive evaluation for agricultural sustainability of different fertilizer management options for a green manure-maize rotation system: Impacts on crop yield, soil biochemical properties and organic carbon fractions. *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 908. 168170.
 26. Kätterer T., Bolinder M.A., Andrén O., Kirchmann H., Menichetti L. Roots contribute more to refractory soil organic matter than aboveground crop residues, as revealed by a long-term field experiment. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2011. Vol. 141. P. 184–192.
 27. 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. 1255056.
 28. Vogel S., Bönecke E., Kling C., Kramer E., Lück K., Nagel A., Philipp G., Rühlmann J., Schröter I., Gebbers R. Base Neutralizing Capacity of Agricultural Soils in a Quaternary Landscape of North-East Germany and Its Relationship to Best Management Practices in Lime Requirement Determination. *Agronomy*. 2020. Vol. 10. №6. 877.
 29. Abdulraheem M.I., Tobe O.K. Green manure for agricultural sustainability and improvement of soil fertility. *Farming & Management*. 2022. Vol. 7. P. 1–8.
 30. Duff J., van Sprang C., O'Halloran J., Hall Z. Guide to Brassica Biofumigant Cover Crops Managing soilborne diseases in vegetable production systems. Horticulture Innovation through VG16068 Optimising cover cropping for the Australian vegetable industry. State of Queensland. Department of Agriculture and Fisheries. 2020. 40 p.
 - of green manures to provide ecosystem services in a semi-arid environment. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*. Vol. 57. №3. P. 409–421.
 3. Kucerik J., Brtnický 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*. Vol. 14. №9. 2001.
 4. Lei B., Wang J., Yao H. (2022). Ecological and Environmental Benefits of Planting Green Manure in Paddy Fields. *Agriculture*. Vol. 12. №2ю 223.
 5. Li P., Jia L., Chen Q., Zhang H., Deng J., Lu J., Xu L., Li H., Hu F., Jiao J. (2024). Adaptive evaluation for agricultural sustainability of different fertilizer management options for a green manure-maize rotation system: Impacts on crop yield, soil biochemical properties and organic carbon fractions. *Science of The Total Environment*. Vol. 908, 168170.
 6. Ma D., Yin L., Ju W., Li X., Liu X., Deng X., Wang S. (2021). Meta-analysis of green manure effects on soil properties and crop yield in northern China. *Field Crops Research*. Vol. 266. 108146.
 7. Pandey A., Kumar K. (2024). The Role of Green Manure in Soil Conservation. *Vigyan Varta*. Vol. 5. №8. P. 236–241.
 8. Patra A., Singh R.P., Kundu M.S., Kumar G., Malkani P., Singh B.K., Choudhury S., Kundu A., Mukherjee S. (2023). Green Manuring: A Sustainable Approach for Soil Health Improvement. *Agriculture & Food E-Newsletter*. Vol. 05. № 04. P. 198–201.
 9. Pimentel M.L., Reis I.M.S., Romano M.L.P.C., de Castro J.S., Vildoso C.I.A., Gasparin E., Sia E.F. de, de Sousa L.S. (2023). Green manure, a sustainable strategy to improve soil quality: A case study in an oxisol from Northern Brazil. *Australian Journal of Crop Science*. Vol. 17. №6. P. 488–497.
 10. Rosenfeld A., Rayns F. (2010). Green manures – implications of economic and environmental benefits on rotational management. *AHDB Factsheet 26/10*. 20 pp.
 11. Talgre L. (2013). 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. Tartu. Estonian University of Life Sciences. 164 pp.
 12. Gentsch N., Riechers F., Boy J., Schwenecker D., Feuerstein U., Heuermann D., Guggenberger G. (2024). Cover crops improve soil structure and change organic carbon distribution in macroaggregate fractions. *Soil*. Vol. 10. P. 139–150.
 13. Pimentel M.L., Reis I.M.S., Romano M.L.P.C., de Castro J.S., Vildoso C.I.A., Gasparin E., Sia E.F. de, de Sousa L.S. (2023). Green manure, a sustainable strategy to improve soil quality: A case study in an oxisol from Northern Brazil. *Australian Journal of Crop Science*. Vol. 17. №6. P. 488–497.
 14. Tsytisiura Y. (2024). Potential of oilseed radish (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.) as a multi-service cover crop (MSCC). *Agronomy Research*. Vol. 22. №2. P. 1026–1070.
 15. Tsytisiura Y. (2024). Evaluation of Ecological Adaptability of Oilseed Radish (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.) Biopotential Realization in the System of Criteria

REFERENCES:

1. Honcharuk I., Tokarchuk D. (2024). Review of the European Experience of AIC Development and the Role of Green Technologies in the Modernisation of This Process. *Baltic Journal of Economic Studies*. Vol. 10. №5. P. 155–165.
2. Deus T.R.V. de, Giongo V., Salviano A. M., Santana M. da S., Silva V.C., da Santos, T.C. dos (2022). Selection

- for Multi-Service Cover Crop. *Journal of Ecological Engineering*. Vol. 25. Iss. 7. P. 265–285.
16. Test Guidelines for the conduct of tests for distinctness, uniformity and stability of Fodder Radish (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.). (2017). International union for the protection of new varieties of plants. UPOV. Geneva. 23 pp.
 17. Bodner G., Alsalem M., Nakhforoosh A. (2021). Root System Phenotyping of Soil-Grown Plants via RGB and Hyperspectral Imaging. *Methods in Molecular Biology*. Issue 2264. P. 245–268.
 18. Bublitz T.A., Kemper R., Müller P., Kautz T., Döring T.F., Athmann M. (2022). Relating Profile Wall Root-Length Density Estimates to Monolith Root-Length Density Measurements of Cover Crops. *Agronomy*. Vol. 12. 48.
 19. Undersander D., Mertens D.R., Thies N. (1993). Forage analyses. Procedures. National Forage Testing Association. 139 pp.
 20. Kemper R. (2024). 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. 195 pp.
 21. Tsytsiura Ya.H. (2024). Osoblyvosti formuvannia korenevoi systemy ta korenevoi biomasy redky oliinoi zalezchno vid ahrotekhnolohichnykh parametriv konstruiuvannia yii tsenozu [*Peculiarities of formation of the root system and root biomass of oil radish depending on agrotechnological parameters of its cenosis design*]. *Ahrarni innovatsii [Agricultural innovations]*. № 24. S. 151–159 (in Ukrainian).
 22. Guinet M., Voisin A.-S., Nicolardot B. (2023). Potential C and N Mineralisation of Shoot and Root Residues from Ten Grain Legume Species As Related to their Biochemical Characteristics. *World Journal of Agriculture and Soil Science*. Vol. 8. №4. WJASS. MS.ID.000691.
 23. Louvieaux J., Leclercq A., Haelterman L., Hermans C. (2020). In-Field Observation of Root Growth and Nitrogen Uptake Efficiency of Winter Oilseed Rape. *Agronomy*. Vol. 10. №1. 105.
 24. Lopez G., Ahmadi S.H., Amelung W., Athmann M., Ewert F., Gaiser T., Gocke M.I., Kautz T., Postma J., Rachmilevitch S., Schaaf G., Schnepf A., Stoschus A., Watt M., Yu P., Seidel, S.J. (2023). Nutrient deficiency effects on root architecture and root-to-shoot ratio in arable crops. *Frontiers in Plant Science*. Vol. 13. 1067498.
 25. Li P., Jia L., Chen Q., Zhang H., Deng J., Lu J., Xu L., Li H., Hu F., Jiao J. (2024). Adaptive evaluation for agricultural sustainability of different fertilizer management options for a green manure-maize rotation system: Impacts on crop yield, soil biochemical properties and organic carbon fractions. *Science of The Total Environment*. Vol. 908. 168170.
 26. Kätterer T., Bolinder M.A., Andrén O., Kirchmann H., Menichetti L. (2011). Roots contribute more to refractory soil organic matter than aboveground crop residues, as revealed by a long-term field experiment. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Vol. 141. P. 184–192.
 27. 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*. Vol. 14. 1255056.
 28. Vogel S., Bönecke E., Kling C., Kramer E., Lück K., Nagel A., Philipp G., Rühlmann J., Schröter I., Gebbers R. (2020). Base Neutralizing Capacity of Agricultural Soils in a Quaternary Landscape of North-East Germany and Its Relationship to Best Management Practices in Lime Requirement Determination. *Agronomy*. Vol. 10. №6. 877.
 29. Abdulaheem M.I., Tobe O.K. (2022). Green manure for agricultural sustainability and improvement of soil fertility. *Farming & Management*. Vol. 7. P. 1–8.
 30. Duff J., van Sprang C., O'Halloran J., Hall Z. (2020). Guide to Brassica Biofumigant Cover Crops Managing soilborne diseases in vegetable production systems. Horticulture Innovation through VG16068 Optimising cover cropping for the Australian vegetable industry. State of Queensland. Department of Agriculture and Fisheries. 40 pp.
- Цицюра Я.Г. Кореневі рештки редьки олійної як додатковий ефективний компонент проміжного сидерального удобрення**
- Мета.** Мета роботи – дослідити розвиток кореневої системи редьки олійної (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.) за показниками біохімічного профілю та біоорганічного потенціалу як компонента удобрення на сірих лісових ґрунтах.
- Методика.** Дослідження проводили впродовж 2014–2024 рр. на дослідному полі Вінницького національного аграрного університету на сірих лісових ґрунтах середнього рівня родючості. Дослід закладено в чотирьох повтореннях із систематичною дворівневою схемою. Основна увага приділялася літньому (проміжному) сидеральному варіанту з оцінкою біопродуктивності формування кореневої системи та повного біохімічного складу кореневої біомаси.
- Результати.** У дослідженні вивчали рівні біопродуктивності формування кореневої біомаси редьки олійної за одинадцятирічний період в умовах нестабільного атмосферного зволоження та помітно мінливого температурного режиму. Середня врожайність сухої кореневої біомаси становила 1,19 т/га, що характеризує культуру як високопродуктивний сидеральний вид з точки зору накопичення кореневих решток за літньої сівби.
- Аналіз біохімічного складу показав, що коренева маса редьки олійної має високий потенціал для удобрення та повільні темпи розкладання. Середній багаторічний агрохімічний потенціал кореневої біомаси був оцінений на рівні 45–65 кг/га азоту, до 7,0 кг/га фосфору, до 40 кг/га калію, до 5,6 кг/га кальцію та до 11 кг/га сірки. Коренева біомаса продемонструвала високий біофумігаційний потенціал, з накопиченням глюकोзинолатів до 20,76 моль/га.
- Динаміка розкладання кореневих решток редьки олійної має повільні темпи, що сприяло поступовому включенню надземної біомаси в ґрунт під час проведення агротехнічних операцій, пов'язаних із застосуванням сидератів.
- Висновки.** Показано, що кореневі рештки редьки олійної є додатковим і важливим компонентом загального потенціалу біопродуктивності сидератів на сірих лісових ґрунтах, особливо порівняно з іншими хрестоцвітими сидеральними культурами. Кореневі рештки підвищують загальний сидеральний потенціал редьки олійної на 11% за вмістом азоту, 5,8% за вмістом фосфору, 18,5% за вмістом калію, 5,9% за вмістом кальцію та 19,6% за вмістом сірки. Крім того, потенціал біофумігації збільшується

щонайменше на 11,7% завдяки нормалізації швидкості розкладання рослинної біомаси в ґрунті та уповільненню мінералізації з коефіцієнтом 1,17. Це в кінцевому підсумку створює сприятливі умови для поглинання поживних речовин ґрунтовим вбирним комплексом та успішному ґрунтовому живленню рослин наступних після сидерації.

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

Tsytsiura Ya.G. Oilseed Radish Root Residues as an Additional Effective Component of Intermediate Green Manure Fertilization

Objective. The purpose of the study was to investigate the development of the root system of oilseed radish (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.) in terms of its biochemical profile and bio-organic potential as a fertilizing component on Grey Forest Soils.

Methods. The research was conducted during 2014–2024 at the experimental field of Vinnytsia National Agrarian University on Grey Forest Soils with medium fertility potential. The experiment was arranged in four replications with a systematic two-tier design. The study focused on the summer (intermediate) green manure variant, assessing the bioproductivity of root system formation and the complete biochemical composition of the root biomass.

Results. The study examined the levels of bioproductivity in oilseed radish root biomass formation over an eleven-year period under unstable atmospheric moisture conditions and markedly variable temperature regimes. The average yield of dry root biomass was 1.19 t/ha, characterizing the crop as a

highly productive green manure species in terms of root residue accumulation during summer sowing.

Biochemical composition analysis identified the root mass as having high fertilizing potential and slow decomposition rates. The long-term average agrochemical potential of the root biomass was estimated at 45–65 kg/ha of nitrogen, up to 7.0 kg/ha of phosphorus, up to 40 kg/ha of potassium, up to 5.6 kg/ha of calcium, and up to 11 kg/ha of sulfur. The root biomass demonstrated a high biofumigation potential, with glucosinolate accumulation reaching up to 20.76 mol/ha.

The decomposition dynamics of oilseed radish root residues were found to be optimized, facilitating the gradual incorporation of aboveground biomass into the soil during green manure-related agrotechnical operations.

Conclusions. It has been shown that oil radish root residues are an additional and important component of the overall potential of green manure bioproductivity on gray forest soils, especially in comparison with other cruciferous green manure crops. Root residues increase the overall green manure potential of oil radish by 11% in terms of nitrogen, 5.8% in terms of phosphorus, 18.5% in terms of potassium, 5.9% in terms of calcium, and 19.6% in terms of sulfur. In addition, the potential for biofumigation increases by at least 11.7% due to the normalization of the decomposition rate of plant biomass in the soil and the slowdown of mineralization with a coefficient of 1.17. This ultimately creates favorable conditions for the absorption of nutrients by the soil absorption complex and successful soil nutrition of the plants following green manure.

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