

РОЛЬ КОРЕНЕВОЇ БІОМАСИ РЕДЬКИ ОЛІЙНОЇ У ФОРМУВАННІ ЇЇ ПОТЕНЦІЙНОЇ СИДЕРАЛЬНОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ

ЦИЦЮРА Я.Г. – кандидат сільськогосподарських наук, доцент

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

Вінницький національний аграрний університет

Постановка проблеми. Сьогодні відбуваються зміни в тактиці удобрення зумовлені як актуалізацією підходів циркулярної економіки, так і внаслідок вираженого дефіциту органічних добрив, зумовлених переробкою відходів тваринництва на біогаз за рахунок процесів анаеробної ферментації [1]. Це істотно розширює заміну класичних органічних добрив на їх альтернативні варіанти у формі рослин-сидератів, які окрім надійного і екологічноспрямованого джерела рослинної органіки, володіють рядом виражених ґрунтореабілітаційних та ґрунтовідновлюючих властивостей [2, 3].

Слід відмітити, що у дослідженні ефективності сидерації основна увага акцентується на вивченні факторів, які визначають якість та обсяги сформованої надземної та кореневої біомаси з оцінкою швидкості її трансформації як альтернативного джерела органіки у ґрунті. За таких підходів залишаються нез'ясованими цілий ряд важливих питань і процесів просторової морфометрії коренів у ґрунтовому профілі, які забезпечують динамізм формування надземної маси, адаптивну пристосованість відповідних видів рослин сидератів до зміни гідротермічних режимів вегетації, вологозабезпечення та ґрунтових умов родючості, вплив на агрофізичні та агрохімічні режими ґрунту [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На думку ряду дослідників [5, 6] ефективну роль сидерату слід обов'язково розглядати з врахуванням дуальних процесів щодо оптимізації умов ґрунтового живлення та супутніх ґрунтових властивостей як з позиції безпосереднього впливу сформованої надземної біомаси у результаті її трансформації у ґрунтовому профілі, так і з позиції впливу кореневої біомаси на ці ж процеси з врахуванням синергічної або ж антиподної дії даних підсистем. Цей вплив визначається оцінкою особливостей динамізму формування коренів за різних варіантів галушення, просторової поширеності з огляду на особливості щільності агроценозу відповідного сидерату та комплексу властивостей ґрунту.

Відмічається, що різні види рослин-сидератів мають широкий інтервал норм реакції залежно від ґрунтово-кліматичних ресурсів території формуючи істотно відмінні варіанти коефіцієнту продуктивності корневих систем, просторову морфометрію та тропачію у межах товщини ґрунтового профілю [7]. Такі особливості формують видоспецифічні процеси взаємодії корневих систем із відповідними ґрунтовими горизонтами та при сидеральному використанні відповідних видів рослин, забезпечують додаткові надходження як органіки у ґрунт, так і формують передумови для зміни окремих агрохімічних та агрофізичних властивостей ґрунту [8].

Інша важлива складова забезпечує вплив на ґрунтовий профіль різних механізмів функціонування кореневої системи як за загального механічного впливу через галушення, вертикальний та радіальний ріст, так і через механізми кореневого поглинання та виділення, формування мікоризних систем, реалізації ефектів ґрунтового дренажу, оструктурення, збільшення загальної пористості та сукупної аерації профілю ґрунту [9, 10].

При цьому вказується на обов'язковість комплексного вивчення взаємодії певного виду рослини-сидерату із ґрунтом з огляду на менш тривалий період імплементації сидеральної маси та більш тривалий період ростових процесів корневих систем та їх послідовного розкладення у ґрунті [11]. За рядом досліджень [12–14] тільки комбінований варіант аналізу гарантує з'ясування ефективності та доцільності сидерації, істотно поліпшує підбір видів сидератів для конкретних ґрунтово-кліматичних умов та різних біоорганічних технологій вирощування сільськогосподарських культур.

У цьому плані в останні періоди активізувались наукові дослідження щодо формування корневих систем рослин-сидератів різних видів [15–18]. У даних дослідженнях наголошується, що рослина сидерат як головний компонент біоорганічного колообігу у системі ґрунт-рослина-довкілля має обов'язково розглядатись у єдиному комплексі динамізму різнонаправлених процесів формування надземної біомаси (вертикальний та радіальний ріст) у зеркальному відображенні аналогічних процесів притаманних кореневій системі.

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 особливостей екологічної адаптивності, просторової її морфометрії для різних варіантів сидерального використання на сірих лісових ґрунтах.

Матеріали та методика досліджень. Дослідження проводились впродовж 2014–2024 рр. на дослідному полі Вінницького національного аграрного університету (N 49°11'31", E 28°22'16".) на сірих лісових ґрунтах. Агрохімічний потенціал поля мав такі середньобагаторічні показники: вміст гумусу 2,68% легкогідролізованого азоту 81,5 мг/кг ґрунту, рухомого фосфору 176,1 мг/кг ґрунту, обмінного калію 110,8 мг/кг ґрунту, $R_{\text{кл}}$ 5,8.

У дослідженнях було використано сорт редьки олійної Журавка. Застосовано сидеральний тип конструювання посівів (норма висіву 2,5 млн. схожих насінин на га за міжряддя 15 см). Досліджувалося два строки сидерації весняний та літній. Весняний строк передбачав посів у першій–другій декаді квітня з досягненням

фази цвітіння (ВВСН 64–67) як оптимальний для сидерації [19] на другу–третю декаду червня. Літній строк відповідав сівбі у другій–третій декаді липня з досягненням фази цвітіння (ВВСН 64–67) на другу–третю декаду жовтня.

Дослідні ділянки було сформовано у чотирьохразовій повторності методом рендомізації з обліковою площею ділянки 25 м². Фенологічні фази розвитку рослин ідентифікували за стандартними шкалами ВВСН. Облік надземної маси рослин проводили на фазу цвітіння методом пробних майданчиків (1 м²) (по 4 у кожному повторенні, зважування на лабораторних вагах (WALCOM LB3002/±0.01 g)). Вміст сухої речовини в надземній та кореневій масі рослин визначали методом висушування до постійної ваги при 105 °С та озоленням при 550 °С [20]. Польовий аналіз біопродуктивності та морфогенезу кореневої системи рослин проводили на фазу цвітіння при застосуванні методу монолітів (відповідно до ряду рекомендацій [21, 22]). 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 дрітаної сітки 4.0 mm, 2.0 mm, 1.0 mm, 0.5 mm and 0.25 mm).

Лінійні морфологічні параметри кореневої системи визначали шляхом прямого вимірювання із використанням електронного штангенциркуля (Digital Caliper, Германія (±0.01 mm)).

Вихід кореневої біомаси (ВКБ) розраховували відповідно до базових рекомендацій [23]. На основі визначеної довжини та маси коренів, отриманих з монолітних зразків (відповідно до [24]), було визначено такі показники (з позначенням відповідно до офіційної міжнародної абревіатури терміну), як: щільність довжини коренів (RLD, см/см³, рівняння 1), щільність маси коренів (RMD, мг/см³, рівняння 2), питома довжина коренів (SRL, м/г, рівняння 3) та відсоток розподілу маси коренів у профілі ґрунту (PRWD (у сирій масі після 3 годин нормального сушіння на повітрі), %, рівняння 4).

$$RLD = \frac{\text{довжина коренів}}{\text{об'єм ґрунту}} \quad (1)$$

$$RMD = \frac{\text{суха маса коренів}}{\text{об'єм ґрунту}} \quad (2)$$

$$SRL = \frac{\text{довжина коренів}}{\text{суха маса коренів}} \quad (3)$$

$$PRWD = \frac{\text{маса коренів для відповідної товщини ґрунтового профілю}}{\text{загальна маса коренів в ґрунтовому профілі}} \times 100 \quad (4)$$

Для аналізу гідротермічних умов було застосовано такі показники як середньодобова температура (°С), сума опадів (мм), відносна вологість повітря (%), гідротермічний коефіцієнт (ГТК) (рівняння 5), Індекс посушливості Де Мартона (I_{DM}) (рівняння 6), Коефіцієнт зволоження (K_s) (рівняння 7).

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

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

$$I_{DM} = \frac{12P_m}{T_m + 10} \quad (6)$$

де P_m і T_m – кількість опадів і середня температура повітря у відповідному місяці відповідно (за IDM можна класифікувати клімат: посушливий $IDM < 10$; 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 $IDM > 55$).

$$K_s = \frac{P}{E} \quad (7)$$

де: K_h – коефіцієнт зволоження; P – сума опадів за аналізований період, мм; E – випаровуваність за аналізований період, мм, яку розраховували за рівнянням 9 (різний ступінь вологості K_s : $K_s > 1,0$ – надмірний, K_s близький до 1 – оптимальний, $K_s = 1,0$ –0,6 – нестабільний, $K_s = 0,6$ –0,3 – недостатній).

$$E = 0,0018 \times (25 + t)^2 \times (100 - a) \quad (8)$$

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

Оцінка гідротермічних умов за період вирощування редьки олійної представлена в таблиці 1.

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

Результати досліджень. Багаторічний період вивчення з міжрічним показником варіювання кількості опадів на рівні 33,78% та середньодобової температури на рівні 17,55%, деталізує гідротермічний режим періоду досліджень як нестабільний (від екстрасушливих умов на фоні інтенсивного наростання середньодобової температури (I_{DM} 2,5; K_s 0,05; ГТК 0,014 (Таблиця 2)) до умов надмірного зволоження на фоні помірних температур (I_{DM} 111,0; K_s 3,29; ГТК 4,902)). Це дозволило оцінити екологічну

Таблиця 1

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

Рік	Сума опадів, мм (IV–VI)	t _{aver} ¹ °C (IV–VI)	Місяці періоду вегетації								
			IV			V			VI		
			ГТК	I _{DM}	K ₃	ГТК	I _{DM}	K ₃	ГТК	I _{DM}	K ₃
Варіант літньої сидерації											
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

Рік	Сума опадів, мм (VII-X)	t _{aver} °C (VII-X)	Місяці періоду вегетації											
			VII			VIII			IX			X		
			ГТК	I _{DM}	K ₃	ГТК	I _{DM}	K ₃	ГТК	I _{DM}	K ₃	ГТК	I _{DM}	K ₃
Варіант осінньої сидерації														
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 ($^{\circ}C$).

адаптаційну стратегію формування кореневої системи редьки олійної та показники її біопродуктивного потенціалу. За результатами тривалих оцінок у різних ґрунтово-кліматичних зонах [25, 26] визначено доцільність використання певного виду рослин у якості покривної культури сидерального та фіторекультивативного напрямку за умови формування надземної фітомаси у сухій речовині на рівні до 1.5–2.0 т/га, а кореневої маси на рівні 0.8–1.0 т/га з коефіцієнтом продуктивності кореневої системи 1.8–2.0. Такі значення формують достатній рівень сидераційного потенціалу рослин з позиції поповнення ґрунту органічною біомасою, оптимізації його агрофізичних і агрохімічних властивостей та забезпечують можливість адаптації рослин до лімітуючих гідротермічних чинників території з огляду на потенціал сформованих кореневих систем. Представленими результатами (Рис. 1) на сірих лісових ґрунтах потенціал родючості яких оцінено як середній – визначено середньобаторічний рівень сформованої кореневої біомаси була 8,45 і 5,26 т/га

у сирій та 1,77 та 1,19 т/га у сухій речовині за рівня міжрічного варіювання в інтервалі 40,86–44,72%.

З позиції поширеності кореневої системи редьки олійної в ґрунтовому профілі за показником відсотку розподілу маси коренів у профілі ґрунту (PRWD) (Таблиця 2) встановлено ряд особливостей, які підтверджують цінність редьки олійної як сидеральної культури. Визначено, що основна маса коренів у середньобаторічному вимірі зосереджена як за весняного, так і за літнього строку сівби на глибині до 30 см – 82,80% та 90,05% відповідно. Структурне співвідношення концентрації маси коренів для глибин 10–20–30 см було 1.00:0.78:0.38 у варіанті весняного строку сівби та 1.00:0.74:0.29 у варіанті літнього строку.

Такий характер формування з огляду на дослідження [7, 18, 19, 26, 27] дозволили віднести редьку олійну до сидеральних культур інтенсивного ґрунтового дренажу у верхній та середній частині ґрунтового профілю за варіанту короткого вегетаційного періоду до сидерального використання. Середні темпи наростання біомаси

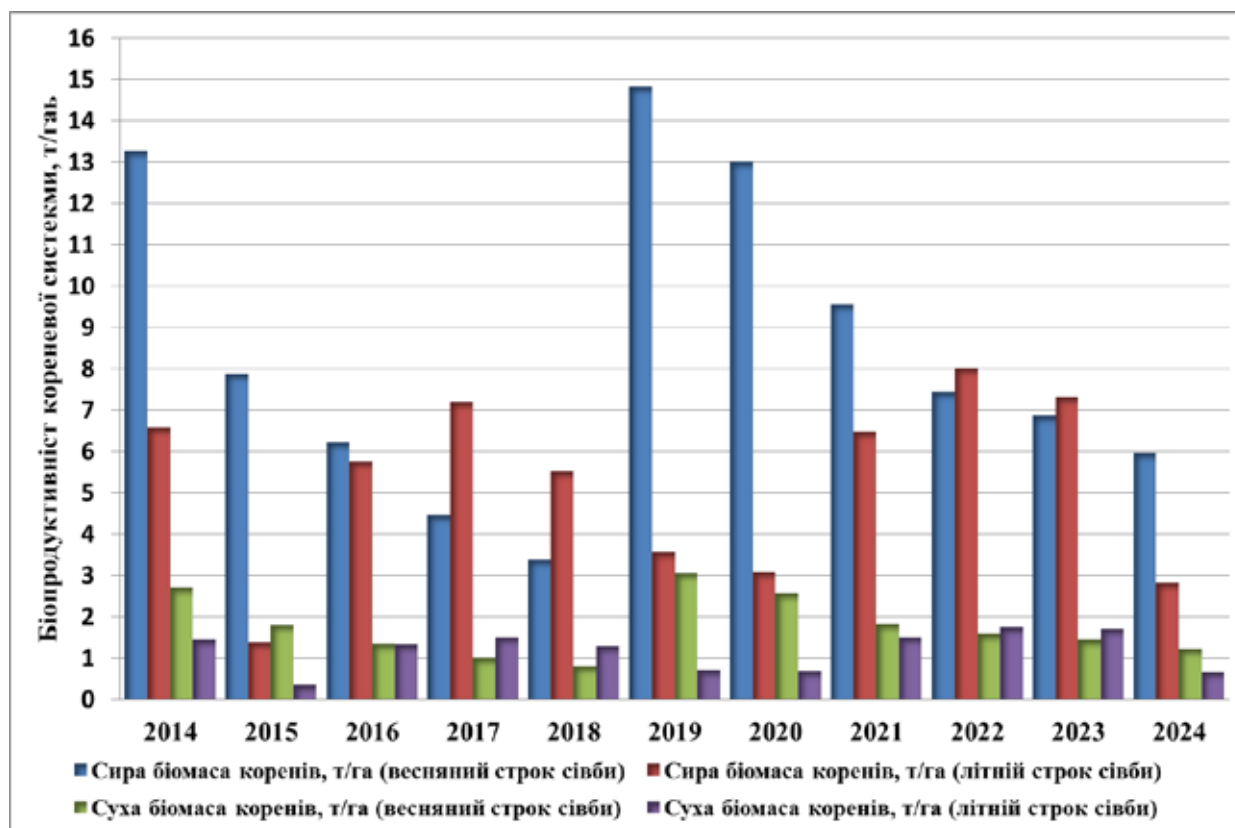


Рис. 1. Показники біопродуктивності кореневої системи редьки олійної на фазу цвітіння (BBCH 64–67), 2014–2024 рр.

коренів з врахуванням темпів ґрунтопоглиблення були за весняного строку сівби на рівні 0,85 %/добу для глибини 0–10 см, 0,81 %/добу для глибини 10–20 см, 0,49 %/добу для глибини 20–30 см та 0,39 %/добу для глибини 30–40 см. Аналогічні показники у варіанті літнього строку сівби були 0,84, 0,73, 0,32 та 0,25 %/добу відповідно.

Межа на рівні глибин 30–40 см була домінуючою у всі роки як зона переходу між щільноконцентрованим варіантом просторового розміщення коренів різного варіанту галушення до дифузного з домінуванням тонких морфологічних елементів кореневих галушень різного порядку.

При цьому потенційна ймовірність ідентифікації кореневої системи за межою 40 см глибини в профілі ґрунту істотно знижується. У підсумку середня багаторічна частка маси коренів для глибини до 50 см становила на рівні 2,12–3,92% за весняного та 0,63–1,18% за літнього строку сівби. Ймовірність ідентифікації коренів для глибини понад 50 см знижується менше 1.5% за весняного та нижче 0.5% за літнього строку сівби. При цьому середня за період оцінки глибина проникнення кореневої системи була 64,41 см за весняного та 47,36 см за літнього строку сівби. Такі параметри дозволили класифікувати розвиток кореневої системи редьки олійної з огляду на вказані строки сидерації (у середньому 50 діб після сходів) та середньорічний досяжний рівень сформованої кореневої біомаси 8,45 за весняного та 5,26 т/га за літнього строку сівби як середньінтенсивний з високими темпами ґрунтопоглиблення

та високою концентрацією біомаси коренів на одиницю об'єму сформованої зони поширеності коренів від осьового центру стрижневої частини кореня.

При цьому встановлено максимальне радіальне поширення бічних коренів в інтервалі від 10 до 17 см залежно від року досліджень з мінімальною індикацією для глибини в інтервалі 50–75 см.

Детальний сегментний аналіз монолітних зразків у вертикальній проекції довів складний ярусний характер формування кореневої системи редьки олійної для обох строків сівби у застосуванні шести градацій відсоткового поширення галушень у межах профілю. В оцінці міжрядкового сегменту оцінки за весняного строку сівби частка коренів із ймовірністю ідентифікації в інтервалі 85–100% була зосереджена у горизонтальному напрямку на відстані 5–8 см від стрижневої частини кореня, а у вертикальному на відстані 24–28 см від поверхні. Максимальна горизонтальна поширеність кореневої системи у середньобагаторічному вимірі була відмічена на глибині 10–12 см на відстані 8–12 см від стрижневої частини кореня. Градаційний крок зміни горизонтального поширення кореневої системи був в інтервалі від 3 до 7 см. Галушення кореневої системи із вертикальним розміщенням у профілі відмічено у зонах із ймовірністю ідентифікації у профілі в інтервалі 40–85%. Довжина даних галушень від 8 до 24 см. Інтенсивність такого галушення за глибиною та частотою появи зростала у напрямку від периферії до осьового центру стрижневої частини кореня.

Таблиця 2

Відсоток розподілу маси коренів у профілі ґрунту (PRWD) редьки олійної на фазу цвітіння (VBCH 64–67) за різного строку сівби, %, 2014–2024

Горизонт профілю грунту, м	Рік спостережень											НІР _{0.5}
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	
Весняний строк сівби												
0,0–0,1	45,8	36,0	43,6	31,1	29,9	47,8	44,3	35,2	34,3	35,3	38,7	1,9
0,1–0,2	33,4	34,5	30,6	25,6	26,8	31,5	28,9	28,5	30,7	31,3	26,5	1,1
0,2–0,3	10,3	11,2	11,5	15,4	15,9	12,1	12,8	20,9	16,9	15,7	17,8	0,8
0,3–0,4	7,1	11,8	10,1	13,2	12,5	6,8	9,7	9,7	10,5	10,9	12,3	0,7
0,4–0,5	2,5	2,9	3,5	8,5	8,9	1,8	2,4	3,4	3,9	2,5	2,8	1,2
0,5–0,6	0,9	1,8	0,7	4,3	2,6		1,9	2,3	2,5	2,3	1,9	0,5
0,6–0,7		1,3		1,2	2,1				1,2	2,0		0,5
0,7–0,8		0,5		0,7	1,3							0,6
0,0–0,3	89,5	81,7	85,7	72,1	72,6	91,4	86	84,6	81,9	82,3	83	1,2
0,0–0,5	99,1	96,4	99,3	93,8	94	100	98,1	97,7	96,3	95,7	98,1	0,7
0,5–1,0	0,9	3,6	0,7	6,2	6,0	0,0	1,9	2,3	3,7	4,3	1,9	1,4
СГПК", см	58,8	75,7	57,9	78,9	79,1	47,5	58,4	55,4	68,4	69,2	57,2	2,3
Літній строк сівби												
0,0–0,1	47,5	49,1	44,1	51,8	49,8	40,4	43,2	35,8	48	39,2	38,2	2,1
0,1–0,2	32,4	43,5	30,8	36,8	32,6	33,5	33,9	29,1	25,7	30,7	31,6	1,7
0,2–0,3	11,5	4,2	13,2	8,4	10,9	14,1	12,8	20,3	16,9	16,3	14,2	1,5
0,3–0,4	8,1	1,4	11,2	2,2	6,3	8,8	9,7	14,1	8,9	13,1	10,8	1,9
0,4–0,5	0,5	1,1	0,7	0,8	0,4	2,7	0,4	0,7	0,5	0,7	4,5	0,5
0,5–0,6		0,7				0,5					0,7	0,3
0,0–0,3	91,4	96,8	88,1	97	93,3	88,0	89,9	85,2	90,6	86,2	84,0	2,1
0,0–0,5	100	99,3	100	100	100	99,5	100	100	100	100	99,3	1,1
0,5–1,0	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,5
СГПК", см	42,8	57,6	46,9	41,3	40,9	58,9	42,5	48,7	40,9	44,7	55,8	3,5

*НІР_{0,5} за принципом арктангенсного перетворення для значень у відсотках; СГПК – середня глибина проникнення кореня.

Зона перекриття галузень кореневої системи редьки олійної у варіанті способу сівби у дослідженнях знаходилась у межах 7–9 см від осевих центрів коренів рослин у рядку та була максимальною на глибині від 6 до 12 см та мала тенденцію до істотного зниження вже з глибини 14–16 см де переважала взаємодія коренів бічного галузнення вертикальної тропачії. Максимальна компактність системи тропачії галузень кореневої системи редьки олійної за весняного строку сівби відмічена на в інтервалі глибини 2–24 см, а максимальна дифузність в інтервалі глибини 44–70 см.

У варіанті літнього строку сівби частка коренів із ймовірністю ідентифікації в інтервалі 85–100% на профілі зосереджувалась у горизонтальному напрямку на відстані 4–7 см від стрижневої частини кореня, а у вертикальному на відстані 18–24 см від поверхні. Максимальна горизонтальна поширеність кореневої системи у середньобаторічному вимірі була відмічена на глибині 8–10 см на відстані 6–8 см від стрижневої частини кореня. Градаційний крок зміни горизонтального поширення кореневої системи був в інтервалі від 3 до 5 см. Інтенсивність вертикального галузнення відповідно до частоти трапляння в сітці профілю на 22,77% була вищою ніж за весняного строку сівби при переважанні

їх розміщення на коренях горизонтального поширення із ймовірністю ідентифікації 40–70%. Довжина за глибиною вертикальних галузень була в середньому на 15,92% меншою ніж аналогічний показник за весняного строку сівби. Максимальна компактність системи тропачії галузень кореневої системи редьки олійної за даного строку сівби визначена в інтервалі глибини 2–14 см, а максимальна дифузність в інтервалі глибини 22–40 см. Зона перекриття галузень кореневої системи була представлена переважно галузненнями вищих порядків та у підсумку була за площею присутності у сітці квадратиків профілю на 18,45% меншою. Ступінь розвитку кореневої системи у загальному вертикальному профілі була 34,85% за 72,25% для глибини 0–30 см. Тобто за літнього строку у редьки олійної формується коренева система із більшою часткою галузень вищих порядків на фоні мініюаризації морфологічних і вагових параметрів даних галузень У межах внутрішньорядкового інтервалу за збереження загального характеру глибини проникнення відмічено загальну редукції бічних галузень у середньому на 18,7% за весняного та 25,9% за літнього строку сівби за одночасного зростання інтенсивності галузнення у зонах перекриття на 41,8% за весняного та на 27,5% за літнього строку сівби сидерату.

Для умов достатнього (умови 2014, 2021, 2022, 2024 років) та надмірного (2019 рік) визначено більш складну конфігурацію профілю за зростання радіального поширення бічних галузень від осі кореня на 15,5–20,7% за одночасного зростання розмаху варіації у числі максимально досяжної довжини індикації та збільшення ординарного положення зони інтенсивного галузнення до рівня глибини профілю 25–40 см. В силу цього за таких умов відмічено формування широкої зони потенційного галузнення на рівні 20–30 см із різким переходом до інтенсивного звуження радіальної поширеності коренів. За умов посушливого періоду вегетації для обох строків зона інтенсивного бічного галузнення набуває вираженого дифузного характеру за повільного зменшення індикації поширеності коренів у горизонтальному напрямку профіля. При цьому визначено адаптивну закономірність зростання глибини проникнення кореневої системи редьки олійної за зниження вологозабезпечення при дефіциті атмосферного зволоження та інтенсивного наростання середньодобової температури, що формує градієнтну межу між зволуженим та критично зневолуженим ґрунтом. Проте у рослин з адаптивними механізмами посухостійкості відмічено посилення ростових процесів кореневої системи за рахунок тонких її морфоелементів [12, 28]

(Рис. 2) із формуванням більш інтенсивного дифузного охоплення відповідного шару профілю ґрунту. Це формувало компенсуючий механізм погіршення ґрунтового вологозабезпечення за рахунок збільшення площі всмоктування [29].

З огляду на представлені ординатні значення вертикальної проникності кореневої системи редьки олійної в роки із низькими значеннями гідротермічного коефіцієнту, коефіцієнтів зволоження та посушливості (Таблиця 1, умови 2015, 2016, 2017 та 2018 року для умов весняного та 2015, 2016, 2019, 2021 року для умов літнього строку сівби при середній глибині індикації проникнення кореневої системи 72,9 см та 55,07 см відповідно), що у середньому на 13,3 см та 14,03 см було вищим, ніж для умов достатнього зволоження (роки 2014, 2019, 2020, 2021 за весняного строку сівби та 2014, 2017, 2018 та 2022 рік за літнього строку сівби) – редьку олійну можна віднести до культур, які володіють даною властивістю, що доводить високу потенційну можливість використання редьки олійної як сидерату у системі проміжного різнострокового використання.

Характер і значення темпів формування кореневої біомаси редьки олійної з точки зору накопичення в ґрунтовому профілі органічної речовини підтверджено аналізом основних констант просторового розвитку коренів.

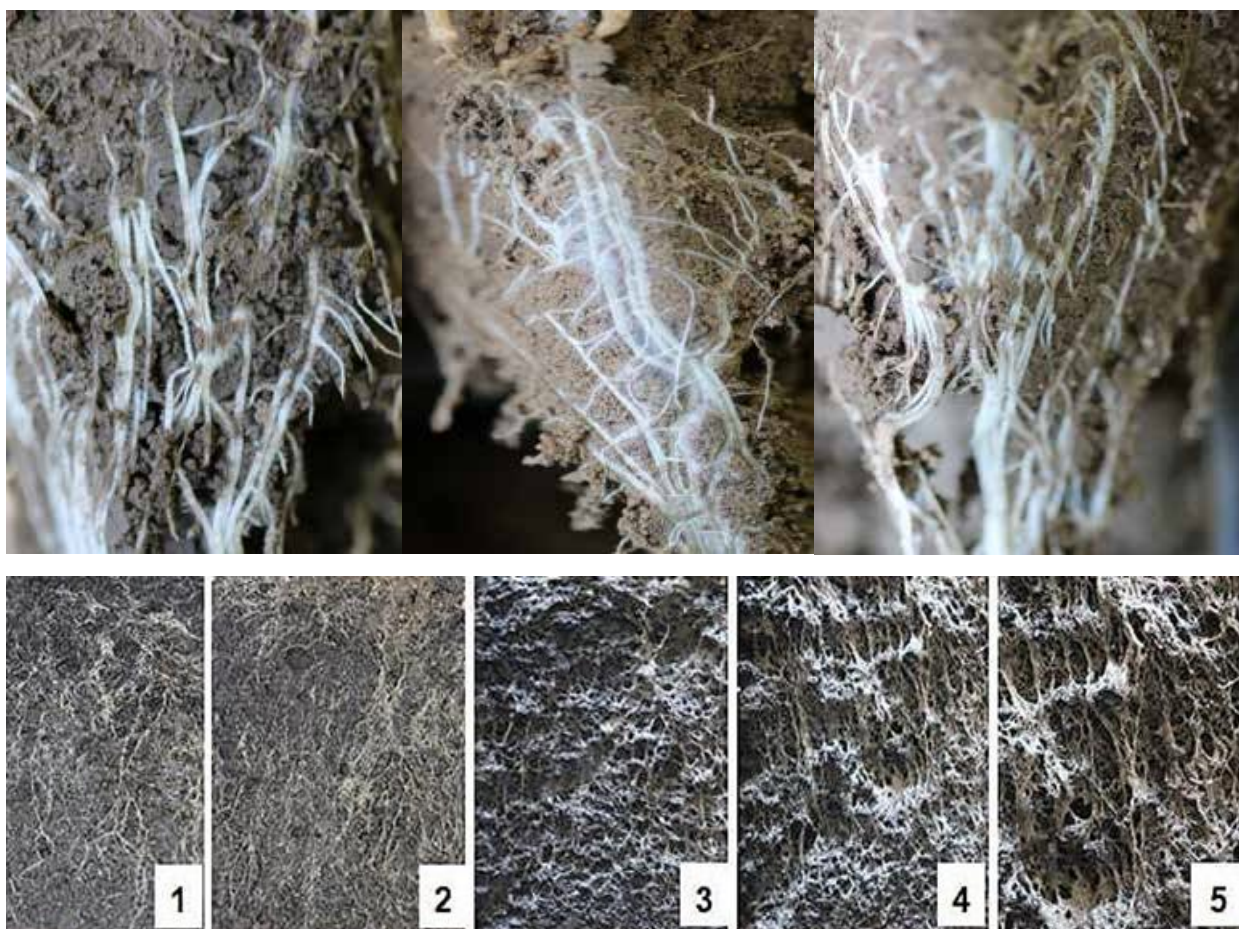


Рис. 2. Відмиті кореневі галузнення редьки олійної третього та наступних порядків у монолітному зразку, 2023 рік (верхня позиція: точкове профільне відмивання; нижня позиція: 1–5 – послідовні етапи профільного відмивання галузень)

Таблиця 3

Морфологічні особливості кореневої системи редьки олійної за весняного строку сівби на фазу цвітіння (ВВСН 64–67), 2014–2024 рр.

Горизонт грунтового профілю	Рік досліджень											НІР _{0,5}
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	
Щільність довжини коренів (RLD), см/см³												
0,0–0,1	5,53	3,58	3,08	1,89	1,71	6,56	5,27	3,85	3,23	2,31	2,24	0,32
0,1–0,2	4,15	3,09	2,71	1,12	1,02	4,89	4,05	2,91	2,19	2,05	1,88	0,68
0,2–0,3	2,92	1,89	0,97	0,91	0,85	3,17	2,84	2,81	1,87	1,59	1,62	0,97
0,3–0,4	1,72	1,55	1,03	0,84	0,72	1,89	2,07	1,58	1,12	1,03	1,09	0,71
0,4–0,5	0,77	0,64	0,52	0,78	0,7	0,68	0,82	0,72	0,44	0,34	0,38	0,29
0,5–0,6	0,32	0,25	0,11	0,71	0,25		0,69	0,44	0,32	0,25	0,22	0,14
0,6–0,7	,	0,19		0,17	0,18				0,21	0,23		0,05
0,7–0,8		0,12		0,15	0,16							0,03
Щільність маси коренів (RMD), мг/см³												
0,0–0,1	0,505	0,237	0,082	0,128	0,123	0,315	0,352	0,215	0,296	0,183	0,204	0,27
0,1–0,2	0,196	0,101	0,058	0,096	0,092	0,125	0,188	0,098	0,102	0,096	0,114	0,74
0,2–0,3	0,105	0,079	0,022	0,052	0,035	0,088	0,096	0,075	0,080	0,058	0,068	0,26
0,3–0,4	0,069	0,055	0,019	0,032	0,021	0,032	0,051	0,034	0,035	0,041	0,032	0,17
0,4–0,5	0,019	0,021	0,011	0,018	0,018	0,009	0,018	0,014	0,012	0,008	0,008	0,08
0,5–0,6	0,007	0,007	0,002	0,017	0,006		0,011	0,008	0,008	0,006	0,003	0,04
0,6–0,7		0,003		0,003	0,003				0,004	0,004		0,01
0,7–0,8		0,002		0,002	0,002							0,01
Питома довжина коренів (SRL), м/г												
0,0–0,1	109,4	150,9	374,7	147,5	138,9	208,1	149,6	178,9	109,0	126,1	109,7	7,11
0,1–0,2	211,5	306,4	469,7	116,6	110,8	390,8	215,2	295,5	214,5	213,3	164,8	5,29
0,2–0,3	277,8	239,0	447,4	174,8	242,6	359,9	295,5	374,3	233,5	273,9	238,0	6,14
0,3–0,4	249,0	281,5	540,9	262,2	342,5	590,0	405,5	471,4	319,7	251,0	340,3	8,42
0,4–0,5	404,9	304,5	472,3	432,9	388,5	754,8	455,1	513,8	366,3	424,6	474,5	10,21
0,5–0,6	456,7	356,8	549,5	417,2	416,3		626,7	553,7	399,6	436,9	732,6	5,08
0,6–0,7		575,2		679,3	561,9				599,4	621,0		9,03
0,7–0,8		631,0		713,6	761,1							11,23

У варіанті весняної сівби (табл. 3) визначалася різка диференціація ґрунтового профілю за лінійним розподілом кореневої системи.

За показником RLD його середнє багаторічне значення для глибин до 10 і до 40 см становило 2,68:1,00. За аналогічного співвідношення для показника RMD 6,28:1,00 редька олійна показала значно вищі темпи лінійного розвитку в ґрунтовому профілі, ніж темпи вагового розвитку кореневої системи, що забезпечило інтенсивність розподілу коренів у ґрунті зі зменшенням їх маси в напрямку від осі стрижневого кореня до периферії потенційного галушення. У всі роки весняної сівби це формувало градієнтні зони з поступовим зменшенням маси коренів при збереженні високих показників лінійного поширення коренів. Ці висновки узгоджуються зі значенням показника SRL при порівнянні верхньої і нижньої зон ґрунтового профілю з фіксацією зростаючої швидкості його наростання зі співвідношенням 0,23:1,00 для верхнього і нижнього десятисантиметрового шару.

Позитивною була також подібність формування вищезазначених показників за умов літньої сівби редьки

олійної на сидерат (табл. 4), що довело цінність культури для варіантів довготривалого проміжного сидерального використання. На фоні середньобагаторічного зменшення лінійного розгалуження на 28,50–48,49% у напрямку від поверхні профілю до глибини залягання коренів за показником RLD при порівнянні літнього строку сівби сидерату з весняним та зменшення RMD на 33,50–70,50% у цій же системі порівняння відмічено переваги цієї культури над іншими традиційними хрестоцвітими сидератами весняно-літнього використання за показниками морфогенезу кореневої системи, особливо в умовах нестійкого зволоження.

При цьому, незважаючи на підвищення загального рівня аридизації строків сидерального використання редьки олійної за літнього строку сівби, редька олійна зберігала високі показники лінійного морфологічного поширення, але знижувала темпи приросту кореневої біомаси, формуючи мережу гілок малого діаметру з низькою масою, але інтенсивним покриттям профілю. Цей характер підтверджується значенням SRL, яке було на 16,35–27,41% вищим для шару ґрунту 0–30 см і на 33,74–67,01% вищим для шару ґрунту

Таблиця 4

Морфологічна характеристика кореневої системи редьки олійної за літнього строку сівби на фазу цвітіння (ВВСН 64–67), 2014–2024

Горизонт профілю грунту, м	Рік досліджень											НІР _{0.5}
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	
Щільність довжини коренів (RLD), см/см³												
0.0–0.1	3.22	2.58	2.88	3.47	3.05	3.16	2.27	2.14	2.06	2.14	2.28	0.29
0.1–0.2	2.12	1.93	1.74	3.05	2.29	2.19	1.77	1.81	1.52	1.56	1.55	0.55
0.2–0.3	1.04	0.35	1.05	1.38	1.15	1.04	0.91	0.89	0.81	0.77	0.82	0.41
0.3–0.4	0.48	0.21	0.79	0.39	0.62	0.69	0.72	0.64	0.53	0.51	0.63	0.27
0.4–0.5	0.11	0.16	0.33	0.21	0.25	0.32	0.11	0.12	0.15	0.19	0.17	0.03
0.5–0.6		0.16				0.25					0.14	0.03
Щільність маси коренів (RMD), мг/см³												
0.0–0.1	0.148	0.152	0.179	0.097	0.074	0.248	0.196	0.174	0.185	0.177	0.125	0.21
0.1–0.2	0.054	0.082	0.091	0.069	0.048	0.160	0.114	0.098	0.069	0.081	0.072	0.53
0.2–0.3	0.041	0.012	0.036	0.022	0.016	0.045	0.035	0.027	0.025	0.021	0.025	0.37
0.3–0.4	0.014	0.006	0.026	0.006	0.014	0.022	0.018	0.017	0.012	0.011	0.015	0.09
0.4–0.5	0.003	0.003	0.006	0.003	0.004	0.006	0.002	0.002	0.002	0.003	0.002	0.01
0.5–0.6		0.002				0.003					0.002	0.02
Питома довжина коренів (SRL), м/г												
0.0–0.1	217.4	169.6	160.7	359.1	412.4	127.3	115.7	122.9	111.2	120.8	182.2	7.55
0.1–0.2	395.4	235.1	191.0	444.3	473.0	136.7	155.1	184.5	220.1	192.4	215.1	5.92
0.2–0.3	253.4	291.4	291.4	635.3	710.5	230.9	260.3	329.3	323.7	366.3	327.7	10.31
0.3–0.4	342.5	349.7	303.5	708.4	442.4	313.3	401.8	376.1	441.2	461.4	419.6	14.25
0.4–0.5	439.6	614.8	532.3	699.3	629.4	524.5	610.5	563.1	739.3	616.1	707.6	15.72
0.5–0.6		789.2				845.8					842.9	16.37

40–60 см порівняно з літньою та весняною сівбою редьки олійної.

Як наслідок, значення SRL для нижніх горизонтів зменшилося до 825,98 м/г за літнього строку сівби порівняно з 701,89 м/г за весняного строку сівби.

В цілому на підставі оцінок інтенсивності розвитку кореневої системи у межах ґрунтового профілю, яку розглядають як вагомий чинник її впливу окрім загального депонування органічного вуглецю на такі параметри ґрунту як пористість, щільність, структурованість, водоутримуюча здатність та повітропроникність [7, 8, 10] та на підставі попередніх досліджень різних видів сидеральних культур [16, 18, 19, 30] редьку олійну слід віднести до цінних сидеральних культур з потенційно високим впливом на динамізм фізичних, фізико-хімічних та агрофізичних ґрунтових процесів у профілі ґрунту товщиною до 70 см.

Висновок. З точки зору формування надземної та кореневої біомаси як для варіанту весняної сівби на літній сидерат, так і для варіанту літньої сівби на осінній сидерат доведено, що за використання редьки олійної, яка формувала на ґрунтах середнього потенціалу родючості на неудобреному фоні в умовах нестійкого зволоження за 11 років досліджень біопродуктивність кореневої маси 8,45 і 5,26 т/га у сирій та 1,77 і 1,19 т/га в сухій речовині відповідно. Доведено, що коренева система редьки олійної за основними критеріями просторового розвитку та розподілу маси в ґрунтовому профілі порівняно з традиційними хрестоцвітими сидератами

сформувала свій адаптивний морфотип, який забезпечив активну взаємодію системи чотирирівневих кореневих гілок з ґрунтовим профілем глибиною 60–80 см за весняної та 40–60 см за літньої сівби сидерату, що узгоджується з класифікацією її придатності до біоорганічних систем сидерації з активним впливом на агрофізичні параметри ґрунтового профілю.

Доведено здатність кореневої системи редьки олійної до адаптивного механізму заглиблення ґрунту з додатковим розгалуженням в умовах дефіциту атмосферної та похідної ґрунтової вологи, що має високий потенціал для використання редьки олійної як покривної та сидеральної культури для зон нестійкого і недостатнього зволоження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Vasileiadou A. From Organic Wastes to Bioenergy, Biofuels, and Value-Added Products for Urban Sustainability and Circular Economy: A Review. *Urban Science*. 2024. Vol. 8. № 3. 121.
2. Fonseca W. da S., Martins S. V., Villa P. M. Green Manure as an Alternative for Soil Recovery in a Bauxite Mining Environment in Southeast Brazil. *Floresta E Ambiente*. 2023. Vol. 30. № 1. e20220041.
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. 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.

4. Písarčík M., Hakl J., Toleikiene M., Fuksa P., Rasmussen J., Hood-Nowotny R. Role of cover crop roots in soil organic carbon accrual – A review. *European Journal of Soil Science*. 2024. Vol. 75. № 4. e13532.
5. 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.
6. Pandey A., Kumar K. The Role of Green Manure in Soil Conservation. *Vigyan Varta*. 2024. Vol.5. № 8. P. 236–241.
7. dos Santos Nascimento G., de Souza T.A.F., da Silva L.J.R. Soil physico-chemical properties, biomass production, and root density in a green manure farming system from tropical ecosystem, North-eastern Brazil. *Journal of Soils and Sediments*. 2021. Vol. 21. P. 2203–2211.
8. 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.
9. Amsili J.P., Kaye J.P. Root traits of cover crops and carbon inputs in an organic grain rotation. *Renewable Agriculture and Food Systems*. 2021. Vol. 36. № 2. P. 182–191.
10. 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.
11. Tang Y., Liu X., Lian J., Cheng X., Wang G.G., Zhang J. Soil Depth Can Modify the Contribution of Root System Architecture to the Root Decomposition Rate. *Forests*. 2023. Vol. 14. № 6., 1092.
12. 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.
13. Mueller C.W., Baumert V., Carminati A., Germon A., Holz M., Kögel-Knabner I., Peth S., Schuter S., Uteau D., Vetterlein D., Teixeira P., Vidal A. From rhizosphere to detritusphere – soil structure formation driven by plant roots and the interactions with soil biota. *Soil Biology and Biochemistry*. 2024. Vol. 9. 109396.
14. Ridgeway J., Kane J., Morrissey E., Starcher H., Brzostek E. Roots selectively decompose litter to mine nitrogen and build new soil carbon. *Ecology Letters*. 2024. Vol. 27. e14331.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. Undersander D., Mertens D.R., Thies N. Forage analyses. Procedures. National Forage Testing Association. 1993. 139 p.
21. 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.
22. Wahlström E.M., Hansen E.M., Mandel A., Garbout A., Kristensen H.L. Munkholm L.J. (2015). Root development of fodder radish and winter wheat before winter in relation to uptake of nitrogen. *European Journal of Agronomy*. 2015. Vol. 71. P. 1–9.
23. Atkinson D., Dawson L.A. Root Growth: Methods of Measurement. In: Smith K.A. Soil and Environmental Analysis. 2nd Edition. CRC Press. 2000. P. 435–498.
24. Wagg C., van Erk A., Fava E., Comeau L.-P., Mitterboeck T.F., Goyer C., Li S., McKenzie-Gopsill A., Mills A. Full-Season Cover Crops and Their Traits That Promote Agroecosystem Services. *Agriculture*. 2021. Vol. 11. 830.
25. Zhang Z., Fan B., Song C., Zhang X., Zhao Q., Ye B. Advances in Root System Architecture: Functionality, Plasticity, and Research Methods. *Journal of Resources and Ecology*. 2023. Vol. 14. № 1. P. 15–24.
26. Diggle A.J. ROOTMAP – a model in three-dimensional coordinates of the growth and structure of fibrous root systems. *Plant and Soil*. 1988. Vol. 105. № 2. P. 169–178.
27. Shukla D., Trivedi P.K., Sahi S. A Simple Protocol for Mapping the Plant Root System Architecture Traits. *Journal of Visualized Experiments*. 2023. Vol. 192. e64876.
28. Dong X., Peng B., Liu X., Qin K., Xue Q., Leskovar D.I. An Automated Calculation of Plant Root Distribution Parameters Based on Root Length Density Data. *Applied Ecology and Environmental Research*. 2018. Vol. 17. № 2. P. 3545–3552.
29. Jabbari H., Khosh kholgh Sima N.A., Akbari G.A., Allahdadi I., Shiranirad A.H., Hamed A. Study of root system relationship with water relations in Rapeseed under drought stress conditions. *Journal of Crops Improvement*. 2016. Vol. 18. № 1. P. 1–19.
30. 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.

REFERENCES:

1. Vasileiadou A. (2024). From Organic Wastes to Bioenergy, Biofuels, and Value-Added Products for

- Urban Sustainability and Circular Economy: A Review. *Urban Science*. Vol. 8. № 3. 121.
2. Fonseca W. da S., Martins S. V., Villa P. M. (2023). Green Manure as an Alternative for Soil Recovery in a Bauxite Mining Environment in Southeast Brazil. *Floresta E Ambiente*. Vol. 30. № 1. e20220041.
 3. Kucerik J., Brtnicky M., Mustafa A., Hammerschmidt T., Kintl A., Sobotkova J., Alamri S., Baltazar T., Latal O., Naveed M., Malicek O., Holatko J. (2024). Utilization of Diversified Cover Crops as Green Manure-Enhanced Soil Organic Carbon, Nutrient Transformation, Microbial Activity, and Maize Growth. *Agronomy*. Vol. 14. № 9. 2001.
 4. Pisarčík M., Hakl J., Toleikiene M., Fuksa P., Rasmussen J., Hood-Nowotny R. (2024). Role of cover crop roots in soil organic carbon accrual – A review. *European Journal of Soil Science*. Vol. 75. № 4. e13532.
 5. 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.
 6. Pandey A., Kumar K. (2024). The Role of Green Manure in Soil Conservation. *Vigyan Varta*. Vol. 5. № 8. P. 236–241.
 7. dos Santos Nascimento G., de Souza T.A.F., da Silva L.J.R. (2021). Soil physico-chemical properties, biomass production, and root density in a green manure farming system from tropical ecosystem, North-eastern Brazil. *Journal of Soils and Sediments*. Vol. 21. P. 2203–2211.
 8. 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.
 9. Amsili J.P., Kaye J.P. (2021). Root traits of cover crops and carbon inputs in an organic grain rotation. *Renewable Agriculture and Food Systems*. Vol. 36. № 2. P. 182–191.
 10. Hudek C., Putinica C., Otten W., De Baets S. (2022). Functional root trait-based classification of cover crops to improve soil physical properties. *European Journal of Soil Science*. Vol. 73. № 1., e13147.
 11. Tang Y., Liu X., Lian J., Cheng X., Wang G.G., Zhang J. (2023). Soil Depth Can Modify the Contribution of Root System Architecture to the Root Decomposition Rate. *Forests*. Vol. 14. № 6., 1092.
 12. 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.
 13. Mueller C.W., Baumert V., Carminati A., Germon A., Holz M., Kögel-Knabner I., Peth S., Schuter S., Uteau D., Vetterlein D., Teixeira P., Vidal A. (2024). From rhizosphere to detritusphere – soil structure formation driven by plant roots and the interactions with soil biota. *Soil Biology and Biochemistry*. Vol. 9. 109396.
 14. Ridgeway J., Kane J., Morrissey E., Starcher H., Brzostek E. (2024). Roots selectively decompose litter to mine nitrogen and build new soil carbon. *Ecology Letters*. Vol. 27. e14331.
 15. 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.
 16. 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.
 17. Hudek C., Putinica C., Otten W., De Baets S. (2022). Functional root trait-based classification of cover crops to improve soil physical properties. *European Journal of Soil Science*. Vol. 73. № 1. e13147.
 18. 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 p.
 19. 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 p.
 20. Undersander D., Mertens D.R., Thies N. (1993). Forage analyses. Procedures. National Forage Testing Association. 139 p.
 21. 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.
 22. Wahlström E.M., Hansen E.M., Mandel A., Garbout A., Kristensen H.L., Munkholm L.J. (2015). Root development of fodder radish and winter wheat before winter in relation to uptake of nitrogen. *European Journal of Agronomy*. Vol. 71. P. 1–9.
 23. Atkinson D., Dawson L.A. (2000). Root Growth: Methods of Measurement. In: Smith K.A. Soil and Environmental Analysis. 2nd Edition. CRC Press. P. 435–498.
 24. Wagg C., van Erk A., Fava E., Comeau L.-P., Mitterboeck T.F., Goyer C., Li S., McKenzie-Gopsill A., Mills A. (2021). Full-Season Cover Crops and Their Traits That Promote Agroecosystem Services. *Agriculture*. Vol. 11. 830.
 25. Zhang Z., Fan B., Song C., Zhang X., Zhao Q., Ye B. (2023). Advances in Root System Architecture: Functionality, Plasticity, and Research Methods. *Journal of Resources and Ecology*. Vol. 14. № 1. P. 15–24.
 26. Diggle A.J. (1988). ROOTMAP – a model in three-dimensional coordinates of the growth and structure of fibrous root systems. *Plant and Soil*. Vol. 105. № 2. P. 169–178.
 27. Shukla D., Trivedi P.K., Sahi S. (2023). A Simple Protocol for Mapping the Plant Root System Architecture Traits. *Journal of Visualized Experiments*. Vol. 192. e64876.
 28. Dong X., Peng B., Liu X., Qin K., Xue Q., Leskovar D.I. (2018). An Automated Calculation of Plant Root Distribution Parameters Based on Root Length Density Data. *Applied Ecology and Environmental Research*. Vol. 17. № 2. P. 3545–3552.
 29. Jabbari H., Khosh kholgh Sima N.A., Akbari G.A., Allahdadi I., Shiranirad A.H., Hamed A. (2016). Study of root system relationship with water relations in

Rapeseed under drought stress conditions. *Journal of Crops Improvement*. Vol. 18. № 1. P. 1–19.

30. Deus T.R.V. de, Giongo V., Salviano A. M., Santana M. da S., Silva V.C., da Santos T.C. dos (2022). Selection of green manures to provide ecosystem services in a semi-arid environment. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*. Vol. 57. № 3. P. 409–421.

Цицюра Я.Г. Роль кореневої біомаси редьки олійної у формуванні її потенційної сидеральної продуктивності

Метою досліджень було встановити особливості формування біопродуктивності кореневої системи редьки олійної з позиції загальнонагових та просторово-нагових параметрів у межах ґрунтового-профілю як додаткових параметрів встановлення сидераційного її потенціалу за весняного та літнього строку сівби.

Методи. Дослідження було проведено впродовж 2014–2024 років на дослідному полі Вінницького НАУ на сірих лісових ґрунтах з середнім потенціалом родючості. Повторність у досліді чотирьохразова. Розміщення варіантів – систематичне у два яруси. Дослід передбачав вивчення для двох варіантів сидерації – літньої за весняного строку сівби та осінньої за літнього строку сівби таких параметрів як: біопродуктивність кореневої системи у загальній сирів та сухій речовинах, щільність довжини коренів (RLD), щільність маси коренів (RMD), питома довжина коренів (SRL, м/г) та відсоток розподілу маси коренів у профілі ґрунту (PRWD).

Результати. Визначено рівні біопродуктивності формування кореневої біомаси за двох базових строків сівби редьки олійної як сидерату. Проаналізовано структуру розподілу ваги кореневої системи у розрізі метрового ґрунтового профілю із технологічним кроком у 10 см при повній деталізації характеру просторової морфометрії кореневої системи у вертикальному та радіальному напрямках профілю.

Визначено багаторічну динаміку за глибиною профілю формування таких морфометричних та морфологічних характеристик кореневої системи як: щільність довжини коренів, щільність маси коренів, питома довжина коренів, відсоток розподілу маси коренів у профілі ґрунту.

Доведено участь кореневої системи у формування її сидераційного потенціалу редьки олійної у частці сформованої кореневої маси як додаткового компоненту біоорганічних систем удобрення.

Висновки. Доведено, що коренева система редьки олійної як за рівнем біопродуктивності так і за рівнем адаптивності з позиції формування її просторової морфометрії та частки присутності у різних горизонтах загального метрового ґрунтового профілю у співставленні до інших традиційних хрестоцвітних сидератів формує позитивний морфотип, який гарантовано забезпечує активну взаємодію ризосфери чотирьохрівневої структури організації з ґрунтовим профілем глибиною 60–80 см за весняної та 40–60 см за літньої сівби сидерату. На підставі чого редьку олійну слід віднести до групи потенційно ефективних сидеральних культур придатних до біоорганічних систем сидерації з активним

впливом на системні агрофізичні параметри ґрунтового профілю.

Ключові слова: біопродуктивність, коренева система, щільність довжини коренів, щільність маси коренів, питома довжина коренів, відсоток розподілу маси коренів у профілі ґрунту.

Tsytsyura Ya.G. The role of oil radish root biomass in the formation of its potential green manure productivity

The aim of the research was to establish the peculiarities of formation of bioproductivity of oil radish root system from the position of total weight and spatial weight parameters within the soil profile as additional parameters for establishing its green manure potential in spring and summer sowing.

Methods. The study was conducted during 2014–2024 on the experimental field of Vinnytsia NAU on gray forest soils with medium fertility potential. The experiment was replicated four times. The placement of the variants is systematic in two tiers. The experiment involved the study of two green manure options – summer green manure with spring sowing and autumn green manure with summer sowing – of such parameters as: bioproductivity of the root system in total wet and dry matter, root length density (RLD), root mass density (RMD), specific root length (SRL, m/g) and percentage of root mass distribution in the soil profile (PRWD).

Results. The levels of bioproductivity of root biomass formation at two basic terms of sowing oil radish as a green manure were determined. The structure of weight distribution of the root system in the context of a meter soil profile with a technological step of 10 cm was analyzed with full detailing of the nature of the spatial morphometry of the root system in the vertical and radial directions of the profile.

The long-term dynamics of the formation of such morphometric and morpho-weight characteristics of the root system as: root length density, root mass density, specific root length, percentage of root mass distribution in the soil profile was determined by the depth of the profile.

The participation of the root system in the formation of its sideration potential of oil radish in the share of the formed root mass as an additional component of bioorganic fertilization systems was proved.

Conclusions. It has been proved that the root system of oil radish, both in terms of bioproductivity and adaptability in terms of the formation of its spatial morphometry and the proportion of presence in different horizons of the total meter soil profile in comparison with other traditional cruciferous green manure crops, forms a positive morphotype that guarantees the active interaction of the rhizosphere of the four-level organization structure with the soil profile 60–80 cm deep during spring and 40–60 cm during summer sowing of green manure. On the basis of this, oil radish should be attributed to the group of potentially effective green manure crops suitable for bioorganic green manure systems with an active influence on the systemic agrophysical parameters of the soil profile.

Key words: bioproductivity, root system, root length density, root mass density, specific root length, percentage of root mass distribution in the soil profile.