

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ КОРЕНЕВОЇ СИСТЕМИ ТА КОРЕНЕВОЇ БІОМАСИ РЕДЬКИ ОЛІЙНОЇ ЗАЛЕЖНО ВІД АГРОТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КОНСТРУЮВАННЯ ЇЇ ЦЕНОЗУ

ЦИЦЮРА Я.Г. – кандидат сільськогосподарських наук, доцент
orcid.org/0000-0002-9167-833X
Вінницький національний аграрний університет

Постановка проблеми. Коренева система будь-якої рослини з позиції її просторового розвитку, глибини проникнення, фізіологічного стану та інтенсивності процесів поглинання води і поживних речовин є визначальною у забезпеченні реалізації як життєвої стратегії рослин, так і їх біопродуктивності. Інтенсивність формування просторової архітектоники рослин у структурі агроценозу в свою чергу залежить від багатьох чинників, основним із яких є індивідуальна площа живлення рослин, агрофізичні параметри ґрунтового профілю, рівень мінерального живлення, потенціал родючості ґрунту, особливості формування гідротермічного режиму основного корневмісного шару ґрунту [1]. При цьому вказується [2–5], що розвиток кореневої системи у структурі розміщення рослин на площі живлення лімітується загальним рівнем конкурентного впливу рослини на рослину, а також такими важливими агрофізичними параметрами ґрунтового профілю як щільність, загальна і капілярна пористість.

Зменшення площі живлення рослин, у наслідок закономірного процесу мінуатюризації органогенезу у рослинних організмів однорічного циклу розвитку, формує в основному три типи реакції – зростання глибини проникнення [6], істотне зменшення загальної біомаси коренів пропорційне зменшенню надземної маси рослин [7], зміна загальних векторів просторового галушення за рахунок появи атипових форм кореневої системи, диспропорційного галушення, асиметричних форм розміщення бічних коренів [8]. Сам характер такої реакції у свою чергу визначається ботаніко-біологічними характеристиками даного виду рослин, рівнем адаптивних пристосувань організму до відповідних умов росту і розвитку [4]. При цьому істотність змін у морфогенезі розвитку кореневої системи рослин однорічного циклу розвитку посилюється при комбінованому поєднанні зменшення індивідуальної площі живлення рослин на фоні повної відсутності його коректування за рахунок внесення додаткових норм мінеральних добрив, або ж напаки за рахунок надмірного удобрення (це формує виражений диспаратет між розвитком кореневої та надземної біомаси рослин, що у підсумку формує багаторівневий та невіривняний за морфологічним розвитком агроценоз з широким інтервалом норми реакції) [9].

Погодні умови також впливають на морфогенез формування кореневої системи традиційних однорічних сільськогосподарських культур [10]. Дефіцит ґрунтового та атмосферного зволоження знижуючи інтенсивність ростових процесів адекватно для надземної та кореневої частин рослин зумовлює зниження загального

лінійного росту та інтенсивності радіального галушення для більшості культур із зон достатнього та нестійкого зволоження [8]. Крім того загальні періоди аридизації періоду вегетації певних видів рослин на фоні відповідних характеристик ґрунтового покриву, зумовлюючи інтенсивне зростання щільності ґрунту, кіркоутворення, формування глибокої структури ґрунтового корневмісного профілю – негативно відображається на ростових процесах і глибині проникнення кореневої системи як головних, так і бічних її осей [11].

Повідомляється, що регулюванням відповідних технологічних параметрів конструювання агроценозу сільськогосподарських культур однорічників, можна формувати відповідну архітектонику їх корневих систем, а отже і впливати на загальні ростові процеси надземної біомаси, рівні зернової (насіневої) продуктивності та істотно поліпшувати ефективність фізіологічної взаємодії між кореневою системою та надземними органами рослин [12].

З іншого боку, сьогодні питання оцінки ефективності конструювання агроценозів сільськогосподарських рослин однорічного циклу розвитку з огляду на закономірності морфогенезу корневих систем є маловивченим, що відкриває шлях до наукового пошуку та узагальнення. Саме тому, робочою гіпотезою наших досліджень було виявлення закономірностей істотності змін окремих показників морфогенезу кореневої системи рослин редьки олійної за широкого інтервалу змін їх площі живлення та додаткового мінерального удобрення.

Матеріали та методика досліджень. Дослідження проводились впродовж 2014–2023 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, рН_{KCl} 5,8. У дослідженнях було використано три сорти редьки олійної (Журавка, Райдуга та Либідь). За встановленої подібності у формуванні показників поставлених на вивчення у статті представлено усереднені результати для трьох вивчаємих сортів. Строк сівби для всіх варіантів досліді ранньовесняний (перша–друга декада квітня) на фоні зяблевої оранки на 20–22 см та проміжного обробітку у форматі культивуації на глибину 8–10 см із вирівнюванням. Схема досліді представлена у табл. 1.

Облік основних морфологічних показників кореневої системи проводили для глибини ґрунтового профілю у 30 см (варіант вивчення за неповним ґрунтовым про-

філем) відповідно до загальнорекомендованих методик [13–18]. Обліковували наступні показники для головного кореня у складі загальної архітектури кореневої системи редьки олійної: діаметр кореня у верхній та нижній частинах (мм) відповідно в інтервалі обліку по профілю 0–30 см для мітки 1–3 та 27–30 см), умовну площу бічної поверхні кореня (см²) та умовний об'єм кореня (см³), кількість бічних галузень кореня (шт.), середня маса кореневої системи рослин (г). Для визначення умовної площі та об'єму кореня рослин застосовано модель зрізаного конуса з констатними формулами для детермінації даних параметрів, якому з математичними складовими та з огляду на ряд досліджень [5, 19] найбільш відповідає головний корінь ряду видів хрестоцвітних культур. Для обліку використано як метод обробки сканованих та фотозображень корневих систем (використовували сканер CanoScan LIDE 700F з відповідним програмним забезпеченням), так і електронний штангенциркуль Digital Caliper (точність вимірювання 0,01 мм), метод USB-мікроскопії з використанням Sigeta CMOS 5100 5.1 MP USB 2.0 з відповідним програмним забезпеченням.

Облік морфометрії корневих систем проводили на фенологічну фазу цвітіння (ВВСН 64–67) відповідно до строків рекомендованого сидерального використання біомаси редьки олійної [20].

В обліку параметрів кореневої системи було застосовано метод монолітів. Моноліти формували з вертикального профілю ґрунту на попередньо підготовлених місцях де було застосовано «Profile Wall Method» [2, 21]. В аналіз було включено два рядки рослин із глибиною охоплення до 10 рослин відповідно до густоти кінцевого стояння на дату обліку у чотирьохразовому повторенні для вагового структурного аналізу корневих систем. Монолітні елементи відбирались по загальному профілю в 30 см з кроком в 10 см. Для цього застосовувались металічні короби 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 пластину з аналогічного матеріалу розміром 10 см× 34 см× 0.3 см. Завдяки такому відбору стінки моноліта ущільнювались природнім шляхом. Кожний

відібраний мікромоноліт маркувався відповідно до порядку його профільного відбору розпочинаючи із поверхні профілю, пакувався у герметичні пакети для відбору. Відмивання коренів із монолітів проводили в лабораторії.

Для промивної сепарації застосовувалась колонка решіт розміщених у порядку зменшення розміру комірок (сіта лабораторні дрітної сітки ткані (відповідно до технічних умов України ТС 14–4–507–99): 4,0 мм, 2,0 мм, 1,0 мм, 0,5 мм та 0,25 мм. Решетна сепарація супроводжувалась застосуванням додаткової подачі води для більш ретельного відмивання. Відмиті та відібрані кореневі рештки зважувались на лабораторних вагах (3100 г/0.01 г) WALCOM LB3002.

Місія аналізів ґрунтового профілю попередньо відмічалась і підтримувалась із початкових етапів вегетації редьки олійної в абсолютно чистому від бур'янів стані (за рахунок постійного ручного прополювання) для уникнення біологічного засмічення коренями рослин інших видів рослин.

Отримані дослідні дані піддавались базовій математичній обробці із використанням загальнозживаних показників варіаційної статистики [22].

Узагальнююча оцінка гідротермічних режимів періоду вегетації редьки олійної у межах років досліджень представлена у таблиці 2. Враховуючи оптимальні параметри для ростових процесів рослин редьки олійної відповідно до наших попередніх багаторічних оцінок [20] роки досліджень було розміщено у наступному порядку зростання сприятливості ростових процесів: 2018–2021–2022–2023–2020–2019.

Результати досліджень. За нашими попередніми багаторічними оцінками [20] у редьки олійної корінь стрижневий (рис. 1–2), біля кореневої шийки потовщений в діаметрі до 2–3 см, має витягнуто-конусоподібну форму. Потовщення може сягати і більших значень до 4–6 см і визначається строками посіву та площею живлення рослин. Глибина проникнення кореня залежить від механічного складу ґрунту: на легких ґрунтах до 60–80 см, а на більш важких – 50–60 см. Основна маса коренів розміщується на глибині 25–30 см, що слід враховувати в агротехніці культури. Найбільш інтенсивний ріст кореневої системи редьки олійної спостерігається від фази розетки до фази бутонізації. Результати обліку мор-

Таблиця 1

Загальна схема досліді з особливостей формування морфогенезу рослин редьки олійної за різного конструювання її агрофітоценозу

Розміщення рослин за рахунок співвідношення норми висіву (фактор В – млн схожих насінин/га) до способу сівби (фактор С – звичайний рядковий спосіб (15 см), широкорядний спосіб (30 см))		Норми добрив (фактор D) ^{*,**} , кг/га
4,0 (1,67 (B ₁) × 15 (C ₁))	2,0 (6,67 (B ₁) × 30 (C ₂))	N ₀ P ₀ K ₀ (D ₁)
3,0 (2,22 (B ₂) × 15 (C ₁))	1,5 (3,33 (B ₂) × 30 (C ₂))	N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ (D ₂)
2,0 (3,33 (B ₃) × 15 (C ₁))	1,0 (2,22 (B ₃) × 30 (C ₂))	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ (D ₃)
1,0 (6,67 (B ₄) × 15 (C ₁))	0,5 (1,67 (B ₄) × 30 (C ₂))	N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀ (D ₄)
Умови року: 2018–A ₁ , 2019–A ₂ , 2020–A ₃ , 2021–A ₄ , 2022–A ₅ , 2023 – A ₆		
Схема комбінацій варіантів		A ₁₋₆ × B ₁₋₄ × D ₁₋₄
Загальна кількість комбінацій (N = 192)		

* – відстань в рядку, см; ** – ширина міжрядь, см; *** – допосівне внесення.

фометрії коренів редьки олійної за умовного відособлення головної осі та ігнорування бічних галузень 3–5 порядків, що відповідає принципам визначення сформованих лінійних та вагових параметрів відпо-

відно до [12, 15] – засвідчили істотний вплив вичаємих припосівних параметрів формування агрофітоценозу на морфологічно-ваговий розвиток кореневої системи рослин редьки олійної (табл. 3).

Таблиця 2

Показники гідротермічного забезпечення періоду вегетації редьки олійної, 2018–2023 рр. (період від посіву до фази цвітіння (ВВСН 64–67))

Рік	Сума опадів, мм (IV–VI)	t _{сєр.} , °C (IV–VI)	Місяці періоду вегетації								
			IV			V			VI		
			ГТК	I _п	K _з	ГТК	I _п	K _з	ГТК	I _п	K _з
2018	170,8	16,38	0,29	10,8	0,19	0,31	7,2	0,12	4,40	103,7	2,31
2019	398,5	15,39	0,57	33,5	0,72	4,9	111,0	3,29	1,68	41,4	0,96
2020	343,8	13,67	0,09	36,4	0,50	5,33	106,4	3,18	1,55	37,3	0,89
2021	282,8	13,26	0,23	38,8	0,96	3,13	66,7	1,64	1,68	39,8	1,00
2022	242,1	14,30	0,56	57,4	2,33	1,43	31,3	0,79	1,50	36,1	0,85
2023	239,8	14,18	1,54	91,5	3,33	0,08	1,9	0,04	1,64	38,9	0,87

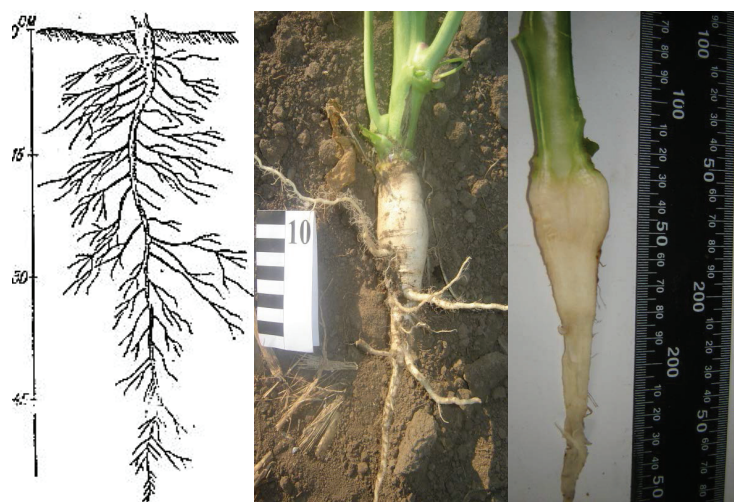


Рис. 1. Коренева система редьки олійної сорту Журавка на фазу цвітіння, 2014, 2020 (крайня ліва позиція загальна просторова структура кореневої системи редьки олійної згідно [20])



Рис. 2. Зліва: варіаційний ряд розвитку кореневого потовщення рослин редьки олійної сорту Журавка залежно від норми висіву (зліва – направо 3, 2, 1,5, 0,5 млн шт./га схожих насінин; справа: характер розвитку кореневої системи в рослин відібраних з площі 0,25 м² для сорту Райдуга за норми висіву 1,5 млн шт./га схожих насінин з внесенням N₆₀P₆₀K₆₀, 2019 р.)

Таблиця 3

Узагальнені морфологічні індивідуальні показники кореневих систем редьки олійної на фазу цвітіння (ВВСН 64–67) залежно від технологічного варіанту побудови агрофітоценозу для товщини ґрунтового профілю 30 см, (середнє за 2018–2023 рр.)

Норма висіву (млн шт./га схожих насінин) (С), спосіб сівби (В)	Добрива (D)	Середнє для трьох сортів (Журавка, Райдуга, Либідь)					
		діаметр кореня, мм		Умовна площа бічної поверхні кореня (S _n), см ²	Умовний об'єм кореня (V _к), см ³	Кількість бічних галузень, шт	Середня вага кореня (m _к), г (x ± SD)
		верхня частина (d ₁)	нижня частина (d ₂)				
4,0, рядковий	1*	8,14	3,11	73,86	21,72	–	1,38 ± 0,19
	2	8,29	3,17	77,09	22,87	–	1,52 ± 0,21
	3	8,38	3,24	81,99	24,16	–	1,55 ± 0,25
	4	8,21	3,14	81,20	23,40	–	1,49 ± 0,21
3,0, рядковий	1	8,51	3,18	82,00	25,12	–	2,89 ± 0,51
	2	8,74	3,22	87,10	26,82	–	2,98 ± 0,52
	3	8,85	3,29	91,26	28,22	–	3,09 ± 0,54
	4	8,72	3,23	92,28	27,84	0,5	3,11 ± 0,59
2,0, рядковий	1	9,87	3,26	95,88	33,46	0,8	4,88 ± 0,83
	2	9,92	3,29	99,97	34,75	1,3	5,11 ± 0,85
	3	10,05	3,31	103,40	36,02	1,5	5,19 ± 0,87
	4	10,11	3,38	107,19	37,28	1,5	5,35 ± 0,89
1,0, рядковий	1	12,52	4,45	133,16	59,56	1,8	8,52 ± 1,35
	2	12,59	4,58	139,94	62,55	1,9	8,78 ± 1,44
	3	12,71	4,67	146,43	65,54	2,1	9,09 ± 1,55
	4	12,97	4,74	155,90	70,47	2,3	9,39 ± 1,69
2,0, wide-row	1	12,15	4,59	127,23	55,21	1,4	3,19 ± 0,66
	2	12,42	4,81	136,91	59,82	1,6	3,58 ± 0,73
	3	12,88	5,09	150,13	67,61	1,6	4,06 ± 0,79
	4	13,24	5,28	158,67	72,89	1,8	4,51 ± 0,82
1,5, широко-рядний	1	16,29	6,36	184,60	107,99	1,9	5,68 ± 1,24
	2	16,65	6,59	204,58	120,27	2,2	6,03 ± 1,32
	3	16,81	6,71	217,31	126,76	2,4	6,91 ± 1,39
	4	16,97	6,91	234,04	137,02	2,5	7,21 ± 1,45
1,0, широко-рядний	1	19,39	6,87	228,46	156,65	2,4	9,15 ± 1,57
	2	19,74	6,97	242,17	165,74	2,7	9,59 ± 1,62
	3	20,25	7,17	257,37	179,06	2,9	10,32 ± 1,82
	4	20,55	7,39	266,60	186,91	3,2	10,62 ± 2,07
0,5, широко-рядний	1	21,59	7,91	282,11	206,46	3,3	15,25 ± 3,18
	2	22,08	8,15	297,98	221,23	3,5	15,96 ± 3,24
	3	23,51	8,33	321,13	249,99	3,7	16,49 ± 3,31
	4	24,11	8,92	345,37	275,04	3,9	17,18 ± 3,39

* – 1 – без добрив, 2 – N₃₀P₃₀K₃₀, 3 – N₆₀P₆₀K₆₀, 4 – N₉₀P₉₀K₉₀.

Продовження табл. 3

HIP ₀₅	d ₁	d ₂	S _n	V _к	m _к	Частка впливу, %	d ₁	d ₂	S _n	V _к	m _к
HIP ₀₅ A	1,01	0,72	6,20	2,51	1,07	A	19,35	20,18	20,76	22,72	16,71
HIP ₀₅ B	1,15	0,75	6,11	2,32	1,03	B	28,89	29,11	29,34	16,13	24,64
HIP ₀₅ C	0,92	0,62	3,16	2,44	1,06	C	24,39	24,25	28,03	31,32	29,59
HIP ₀₅ D	0,78	0,47	3,16	2,44	1,06	D	16,51	15,58	10,31	16,34	19,60
HIP ₀₅ AB	1,09	0,68	10,30	2,75	1,11	AB	1,98	2,15	1,52	0,24	0,27
HIP ₀₅ AC	0,98	0,71	8,42	3,10	1,17	AC	1,79	1,93	1,40	0,48	0,38
HIP ₀₅ AD	0,98	0,71	8,42	3,10	1,17	AD	0,67	0,78	0,50	0,16	0,21
HIP ₀₅ BC	1,07	0,77	7,24	2,68	1,09	BC	3,25	2,96	5,24	7,69	4,20
HIP ₀₅ BD	1,07	0,77	7,24	2,68	1,09	BD	1,56	1,25	1,39	0,63	0,91
HIP ₀₅ CD	1,11	0,81	6,30	2,89	1,13	CD	0,98	1,02	1,06	3,35	2,90
HIP ₀₅ ABC	1,20	0,73	12,60	4,14	1,25	ABC	0,52	0,71	0,23	0,16	0,12

Продовження табл. 3

$HIP_{0.5}$ ABD	1,20	0,73	12,60	4,14	1,25	ABD	0,05	0,03	0,06	0,01	0,01
$HIP_{0.5}$ ACD	1,34	0,62	13,85	4,20	1,36	ACD	0,02	0,03	0,06	0,08	0,07
$HIP_{0.5}$ BCD	1,07	0,71	10,49	3,62	1,20	BCD	0,02	0,01	0,08	0,67	0,37
$HIP_{0.5}$ ABCD	1,29	0,79	18,20	4,29	1,52	ABCD	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02

Встановлено, що зміна ширини міжрядь мала позитивноформуючий характер на морфометрію кореневої системи – усереднений індекс росту у співставленні звичайного рядкового та широкорядного способу сівби для показника діаметру кореня у верхній частині (d_1) склав 1,82 для діаметру кореня у нижній частині (d_2) 1,88, для умовної площі бічної поверхні кореня (S_n) 2,22, для умовного об'єму кореня (V_k) 3,28 та середньої ваги кореня (m_k) 1,96. Застосування мінеральних добрив мало також позитивний вплив на величину даних показників. У середньому для варіанту у межах норми висіву та способу сівби $N_{90}P_{90}K_{90}$ (D_1) вказані показники склали такий ряд значень 13,56 мм, 4,97 мм, 150,91 cm^2 , 83,27 cm^3 та 6,37 г. За внесення $N_{30}P_{30}K_{30}$ (D_2) усереднений приріст морфологічних параметрів кореневої системи склав 4,73%, за внесення $N_{60}P_{60}K_{60}$ (D_3) – 10,24% та за внесення $N_{90}P_{90}K_{90}$ (D_4) – 14,75%. Отримані результати узгоджуються із показниками результатів дисперсійної обробки та проведенням факторним аналізом у виразі частки впливу факторів дослідження. У порядку вагомості даного впливу їх можна розмістити у наступному динамічному ряду: мінеральні добрива (15,67% частка впливу за головним компонентом) – гідротермічні умови періоду вегетації (19,94%) – спосіб сівби

(25,62%) – норма висіву (27,52%). При цьому слід відмітити високий рівень варіювання облікових показників у межах кожного із комбінацій варіантів. Так, для норми висіву 4,0 млн. шт./га схожих насінин коефіцієнт варіації діаметру стебла становив 27,8%, відповідно умовних параметрів площі та об'єму на рівні 26,9–33,5%. В міру збільшення площі живлення однієї рослини ступінь варіювання зростала і повідношенню до варіанту з нормою висіву 0,5 млн. шт./га її величина залежно від показника зростала на 6,3–8,9%, що узгоджується із висновками щодо віталітетної тактики рослин редьки олійної у агроценозах різної щільності [20]. На основі цього доведено спільні особливості розвитку архітекtonіки кореневих систем редьки олійної у співставленні до таких культур як ріпак ярий і озимий [2, 5], гірчиця біла [24] та дикі види хрестоцвітних [25] згідно яких у межах орного горизонту кореневі системи хрестоцвітних видів в цілому позитивно реагують на оптимізацію площі живлення та умов ґрунтового живлення. Проте для редьки олійної доведено і ряд особливостей. Зокрема за знижених норм висіву змінюється форма кореня із витягнутої конусоподібної до опуклої веретеноподібної (рис. 2) із інтенсивним галузненням у зоні 11–21 см за довжиною кореня (рис. 1, рис. 3 (нижня позиція)). При цьому, кількість галузень

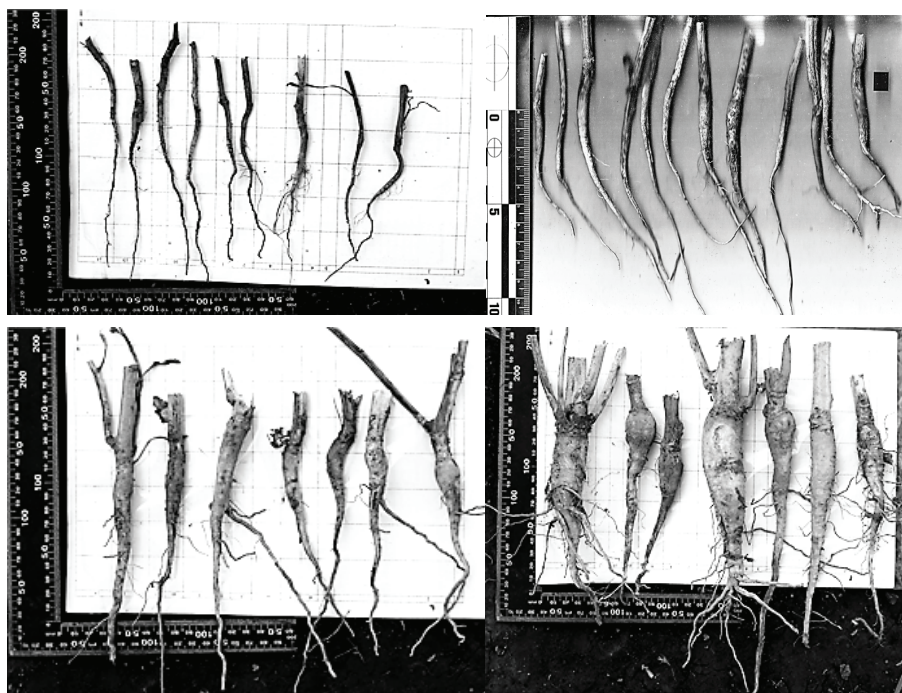


Рис. 3. Коренева система (верхня позиція: для рослин варіанту 4 млн шт./га схожих насінин на фоні $N_{90}P_{90}K_{90}$ (зліва рослин нижнього ярусу, справа – верхнього); нижня позиція: для рослин варіанту 0,5 млн шт./га схожих насінин на фоні $N_{90}P_{90}K_{90}$ (зліва рослин нижнього ярусу, справа – верхнього), 2018 р.

коливається в інтервалі від 1,5 до 4,0 і не відмічена за всі роки спостережень за орми висіву в інтервалі 3–4 млн шт./га схожих насінин на всіх фонах удобрення. Іншою особливістю є формування ідіотипічних форм кореневої системи у рослин різних ярусів агроценозу редьки олійної доведено нами у попередніх дослідженнях [23] як за підвищених, так і за знижених норм висіву, що узгоджується з наведеними даними по рівню варіювання морфологічних параметрів корневих систем (рис. 3). При цьому зниження загального варіювання на фоні зростання норм висіву та відповідно зменшення площі живлення пов'язано із чинниками агроценотичного тиску, який відповідно до [26] нормалізує фенотипові реакції рослин та звужує інтервал розмаху значень морфологічних показників основних частин рослини.

На підставі отриманих даних зниження ценотичної щільності та оптимізація мінерального живлення у редьки олійної з високим рівнем прогнозування зумовить підвищення морфологічного варіювання параметрів корневих систем, що слід враховувати у приписівному конструюванні агрофіоценозів даної культури, а також при плануванні її використання для сидеральних технологій, оскільки у даному випадку сформована коренева біомаса буде додатковою невід'ємною частиною загальної фітомаси, надходження якої буде обліковуватись у плані визначення технологічності та ефективності сидерації, строків її проведення та етапності імплементації ґрунтом сформованої сидеральної маси після відповідних агротехнологічних операцій підготовки. Щодо останнього фактору, то важливим є аналіз сформованої ваги корневих систем у розрізі вивчаємих технологічних варіантів конструювання її агроценозу та визначення загальної сформованої кореневої біомаси в ґрунтовому профілі стан-

дартного орного горизонту (0–30 см). Слід зауважити, що відповідно до значень стандартного відхилення (SD) показника ваги коренів (m_k) варіативність його значення має туж тенденцію до зростання від 13,72% для варіанту 4,0 млн схожих насінин/га за рядкової сівби на неудобреному фоні до 19,74% у варіанті 0,5 млн схожих насінин/га на фоні із внесенням $N_{90}P_{90}K_{90}$. У підсумку середня за період сформована коренева біомаса рослин редьки олійної буде коливатись у межах від 5,52 т/га до 10,82 т/га (рис. 4).

Згідно отриманих даних, максимальну кореневу біомасу редька олійна за період досліджень формувала у варіантах з нормою висіву 2,0 млн схожих насінин/га за звичайної рядкової сівби на фоні $N_{90}P_{90}K_{90}$ на рівні 10,70 т/га та у варіанті з нормою висіву 1,5 млн схожих насінин/га за широкорядної сівби на фоні $N_{90}P_{90}K_{90}$ на рівні 10,82 т/га. Це дозволяє скорегувати рекомендовані варіанти норми висіву та удобрення редьки олійної за її вирощування як сидерату у варіантах ранньовесняної сівби із 2,5–3,0 млн схожих насінин/га звичайним рядковим способом [27–30] на вказані нами, як найбільш продуктивні за умов нестійкого зволоження на ґрунтах із середнім потенціалом ґрунтової родючості. При цьому з врахуванням показника сформованої кореневої біомаси відповідно до класифікуючого групування [30] редьку олійну за цим показником для умов нестійкого зволоження можна віднести до високопродуктивних культур для використання у системі сидеральних та біоорганічних ґрунтовідновлювальних технологій.

Висновки. За результатами представлених досліджень доведена можливість формування бажаних морфологічних та вагових параметрів кореневої системи редьки олійної за рахунок зміни норми висіву,

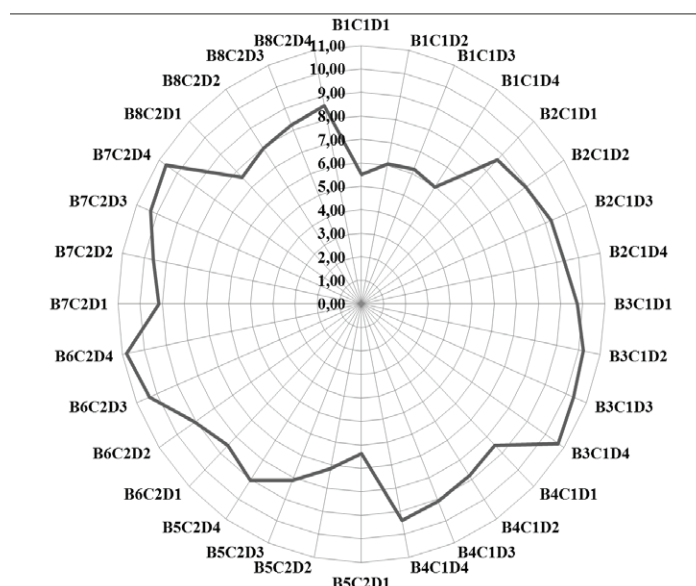


Рис. 4. Показники сформованої кореневої біомаси рослинами редьки олійної (середнє по сортах) на фазу цвітіння (ВВСН 64–67) за різних технологічних варіантів конструювання її агроценозу, т/га (середнє за період 2018–2023 рр., $V_1C_1D_1$ – комбінаторика варіантів відповідно до схеми досліджу (табл. 1); HIP_{05} т/га (заг.) = 1,63)

способу сівби та удобрення у такому зростаючому ряду прогнозованого агротехнологічного впливу: мінеаральні добрива – гідротермічні умови періоду вегетації – спосіб сівби – норма висіву. Максимально досяжний рівень формування кореневої біомаси. встановлено у варіанті ширококорядної сівби нормою висіву 1,5 млн схожих насінин/га за використання фонового мінерального живлення $N_{90}P_{90}K_{90}$ – 10,82 т/га.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Koyama T., Murakami S., Karasawa T. Complete root specimen of plants grown in soil-filled root box: sampling, measuring, and staining method. *Plant Methods*. 2021. Vol. 17. 97.
2. Kemper R., Bublitz T.A., Müller P., Kautz T., Döring T.F., Athmann M. Vertical root distribution of different cover crops determined with the profile wall method. *Agriculture*. 2020. Vol. 10. 503.
3. Hudek C., Putinica C., Otten W., De Baets S. Functional root trait-based classification of cover crops to improve soil physical properties. *European Journal of Soil Science*. 2022. Vol. 73. №1. e13147.
4. Bontpart T., Concha Vidal C., Giuffrida M.V., Robertson I., Admkie K., Degefu T., Girma N., Tesfaye K., Haileselassie T., Fikre A., Fetene M., Tsiftaris S., Doerner P. Affordable and robust phenotyping framework to analyse root system architecture of soil-grown plants. *The Plant Journal* 2020. Vol. 103. №6. P. 2330–2343.
5. Liu L.P., Gan Y.T., Bueckert R., Rees K.V.. Rooting systems of oilseed and pulse crops I: temporal growth patterns across the plant developmental periods. *Field Crop Research*. 2011. Vol. 122. P. 256–263.
6. Liu L.P. Root systems of oilseed and pulse crops morphology, distribution and growth patterns. PhD Thesis. Department of Plant Sciences University of Saskatchewan Saskatoon. SK. 2009, 136 p.
7. Thorup-Kristensen K., Kirkegaard J. Root system-based limits to agricultural productivity and efficiency: the farming systems context. *Annals Botany*. 2016. Vol. 118. № 4. P. 573–592.
8. Maan C., ten Veldhuis M.-C., van de Wiel B.J.H.. Dynamic root growth in response to depth-varying soil moisture availability: a rhizobox study. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2023. Vol. 27. P. 2341–2355.
9. Bodner G., Loiskandl W., Hartl W., Erhart E., Sobotik M.. Characterization of Cover Crop Rooting Types from Integration of Rhizobox Imaging and Root Atlas Information. *Plants*. 2019. Vol. 8. № 11. 514.
10. Rellán-Álvarez R., Lobet G., Dinneny J.R. Environmental Control of Root System Biology. *Annual Reviews Plant Biology* 2016. Vol. 67. P. 619–642.
11. Takahashi H., Pradal C. Root phenotyping: important and minimum information required for root modeling in crop plants. *Breed Science* 2021. Vol. 71. №1. P. 109–116.
12. Adu M.O. Variations in root system architecture and root growth dynamics of brassica rapa genotypes using a new scanner-based phenotyping system. University of Nottingham School of Biosciences Sutton Bonington, 2014, 283 p.
13. Liu L., Gan Y., Bueckert R.A., Van Rees K. Rooting systems of oilseed and pulse crops. II: Vertical distribution patterns across the soil profile. *Field Crop Research*. 2011. Vol. 122. P. 248–255.
14. Merrill S.D.; Tanaka D.L., Hanson J.D. Root length growth of eight crop species in Haplustoll soils. *Soil Science Society of America Journal* 2002. Vol. 666. №3. P. 913–923.
15. Frasier I., Noellemeyer E., Fernández R., Quiroga A.. Direct field method for root biomass quantification in agroecosystems. *MethodsX*. 2016. Vol. 4. №3. P. 513–519.
16. Himmelbauer M.L., Loiskandl W., Kastanek F. Estimating length, average diameter and surface area of roots using two different image analysis systems. *Plant Soil*. 2004. Vol. 260. P. 111–120.
17. Persson H., Baitulin I.O. Plant root systems and natural vegetation. *Acta Phytogeographica Suecica* 81. Opulus Press AB Uppsala. 1996, 131 p.
18. Schenk H.J., Jackson R.B. Rooting depths, lateral root spreads and below-ground/above-ground allometries of plants in water-limited ecosystems. *Journal of Ecology*. 2002. Vol. 90. P. 480–494.
19. Sultan S., Snider J., Conn A., Li M., Topp C.N., Navlakha S. A Statistical Growth Property of Plant Root Architectures. *Plant Phenomics*. 2020. 2073723.
20. Цицюра Я.Г., Цицюра Т.В. Редька олійна. Стратегія використання та вирощування: монографія. Вінниця: ТОВ «Нілан ЛТД», 2015. 624 с.
21. Cutforth H.W., Angadi S.V., McConkey B.G., Miller P.R., Ulrich D., Gulden R., Volkmar K.M., Entz M.H., Brandt S.A. Comparing rooting characteristics and soil water withdrawal patterns of wheat with alternative oilseed and pulse crops grown in the semiarid Canadian prairie. *Canadian Journal of Soil Science* 2013. Vol. 93. P. 147–160.
22. Wong J. Handbook of statistical analysis and data mining applications. Cambridge, Academic Press, 2018. 589 p.
23. Цицюра Я.Г. Оцінка ефективності конструювання агрофітоценозів та удобрення редьки олійної на основі модульно-віталітетного методу. *Сільське господарство та лісівництво*. 2019. № 3(14). С. 57–78.
24. Dharmasri L.C., de Jong, E., Cowell L.E. Effective rooting depth of mustard under dryland conditions. Dept. of Soil Science, University of Saskatchewan. 1993. [Electronic resource] URL: <http://hdl.handle.net/10388/10502> (accessed on 30 April 2024).
25. Kashyap A., Kumari S., Garg P., Kushwaha R., Tripathi S., Sharma J., Gupta N.C., Kumar R.R., Yadav R., Vishwakarma H. Indexing Resilience to Heat and Drought Stress in the Wild Relatives of Rapeseed-Mustard. *Life*. 2023. Vol. 13. №3. 738.
26. Злобін Ю.А. Алгоритм оцінки віталітету особин рослин і віталітетної структури фітопопуляцій. *Чорноморський ботанічний журнал*. 2018. Том 14, № 3. С. 213–226.
27. Лисянський О.Л. Ефективність удобрення сидеральних культур на чорноземі опідзоленому Правобережного Лісостепу України: дис. ... канд. с.-г. наук : 06.01.04 / Лисянський Олександр Леонідович ; Нац. акад. аграр. наук України, Нац. наук. центр «Ін-т ґрунтознавства та агрохімії ім. О. Н. Соколовського». Харків, 2018. 246 с.
28. Bhogal A., White C., Morris N. Project Report №. 620 Maxi Cover Crop: Maximising the benefits from cover crops through species selection and crop management.

- AHDB Cereals & Oilseeds is a part of the Agriculture and Horticulture Development Board (AHDB). 2018, 111 pp.
29. Quintarelli V., Radicetti E., Allevato E., Stazi S.R., Haider G., Abideen Z., Bibi S., Jamal A., Mancinelli R. Cover Crops for Sustainable Cropping Systems: A Review. *Agriculture*. 2022. Vol. 12. 2076.
 30. White C.A., Holmes H.F., Morris N.L., Stobart R.M. A review of the benefits, optimal crop management practices and knowledge gaps associated with different cover crop species. *Research Review* №. 90. AHDB Cereals & Oilseeds. 2016, 90 p.
- REFERENCES:**
1. Koyama T., Murakami S., Karasawa T. (2021). Complete root specimen of plants grown in soil-filled root box: sampling, measuring, and staining method. *Plant Methods*. Vol. 17. 97.
 2. Kemper R., Bublitz T.A., Müller P., Kautz T., Döring T.F., Athmann M. (2020). Vertical root distribution of different cover crops determined with the profile wall method. *Agriculture*. Vol. 10. 503.
 3. 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.
 4. Bontpart T., Concha Vidal C., Giuffrida M.V., Robertson I., Admkie K., Degefu T., Girma N., Tesfaye K., Haileselassie T., Fikre A., Fetene M., Tsaftaris S., Doerner P. (2020). Affordable and robust phenotyping framework to analyse root system architecture of soil-grown plants. *The Plant Journal*. Vol. 103. №6. P. 2330–2343.
 5. Liu L.P., Gan Y.T., Bueckert R., Rees K.V. (2011). Rooting systems of oilseed and pulse crops I: temporal growth patterns across the plant developmental periods. *Field Crop Research*. Vol. 122. P. 256–263.
 6. Liu L.P. (2009). Root systems of oilseed and pulse crops morphology, distribution and growth patterns. PhD Thesis. Department of Plant Sciences University of Saskatchewan Saskatoon. SK. 2009, 136 p.
 7. Thorup-Kristensen K., Kirkegaard J. (2016). Root system-based limits to agricultural productivity and efficiency: the farming systems context. *Annals Botany*. Vol. 118. № 4. P. 573–592.
 8. Maan C., ten Veldhuis M.-C., van de Wiel B.J.H. (2023). Dynamic root growth in response to depth-varying soil moisture availability: a rhizobox study. *Hydrology and Earth System Sciences*. Vol. 27. P. 2341–2355.
 9. Bodner G., Loiskandl W., Hartl W., Erhart E., Sobotik M. (2019). Characterization of Cover Crop Rooting Types from Integration of Rhizobox Imaging and Root Atlas Information. *Plants*. Vol. 8. № 11. 514.
 10. Rellán-Álvarez R., Lobet G., Dinneny J.R. (2016). Environmental Control of Root System Biology. *Annual Reviews Plant Biology*. Vol. 67. P. 619–642.
 11. Takahashi H., Pradal C. (2021). Root phenotyping: important and minimum information required for root modeling in crop plants. *Breed Science*. Vol. 71. №1. P. 109–116.
 12. Adu M.O. (2014). Variations in root system architecture and root growth dynamics of brassica rapa genotypes using a new scanner-based phenotyping system. University of Nottingham School of Biosciences Sutton Bonington, 283 p.
 13. Liu L., Gan Y., Bueckert R.A., Van Rees K. (2011). Rooting systems of oilseed and pulse crops. II: Vertical distribution patterns across the soil profile. *Field Crop Research*. Vol. 122. P. 248–255.
 14. Merrill S.D.; Tanaka D.L., Hanson J.D. (2002). Root length growth of eight crop species in Haplustoll soils. *Soil Science Society of America Journal*. Vol. 666. №3. P. 913–923.
 15. Frasier I., Noellemeyer E., Fernández R., Quiroga A. (2016). Direct field method for root biomass quantification in agroecosystems. *MethodsX*. Vol. 4. №3. P. 513–519.
 16. Himmelbauer M.L., Loiskandl W., Kastanek F. (2004). Estimating length, average diameter and surface area of roots using two different image analysis systems. *Plant Soil*. Vol. 260. P. 111–120.
 17. Persson H., Baitulin I.O. (1996). Plant root systems and natural vegetation. *Acta Phytogeographica Suecica* 81. Opulus Press AB Uppsala, 131 p.
 18. Schenk H.J., Jackson R.B. (2002). Rooting depths, lateral root spreads and below-ground/above-ground allometries of plants in water-limited ecosystems. *Journal of Ecology*. Vol. 90. P. 480–494.
 19. Sultan S., Snider J., Conn A., Li M., Topp C.N., Navlakha S. (2020). A Statistical Growth Property of Plant Root Architectures. *Plant Phenomics*. 2073723.
 20. Tsytsiura Ya.H., Tsytsiura T.V. (2015). Redka oliina. Stratehiia vykorystannia ta vyroshchuvannia: monohrafiia [Oilseed radish. Strategy of use and cultivation: a monograph]. Vinnytsia: TOV «Nilan LTD», 624 p [in Ukrainian].
 21. Cutforth H.W., Angadi S.V., McConkey B.G., Miller P.R., Ulrich D., Gulden R., Volkmar K.M., Entz M.H., Brandt S.A. (2013). Comparing rooting characteristics and soil water withdrawal patterns of wheat with alternative oilseed and pulse crops grown in the semiarid Canadian prairie. *Canadian Journal of Soil Science* 2013. Vol. 93. P. 147–160.
 22. Wong J. (2018). Handbook of statistical analysis and data mining applications. Cambridge, Academic Press, 589 p.
 23. Tsytsiura Ya.H. (2019). Otsinka efektyvnosti konstruiuvannia ahrofitotsenoziv ta udobrennia redky oliinoi na osnovi modulno-vitalitetnoho metodu [Evaluation of the efficiency of agrophytocenosis design and fertilisation of oil radish based on the modular-vitalite method]. *Silske gospodarstvo ta lisivnytstvo – Agriculture and forestry*. № 3(14). pp. 57–78 [in Ukrainian].
 24. Dharmasri L.C., de Jong, E., Cowell L.E. (1993). Effective rooting depth of mustard under dryland conditions. Dept. of Soil Science, University of Saskatchewan. [Electronic resource] URL: <http://hdl.handle.net/10388/10502> (accessed on 30 April 2024).
 25. Kashyap A., Kumari S., Garg P., Kushwaha R., Tripathi S., Sharma J., Gupta N.C., Kumar R.R., Yadav R., Vishwakarma H. (2023). Indexing Resilience to Heat and Drought Stress in the Wild Relatives of Rapeseed-Mustard. *Life*. Vol. 13. №3. 738.
 26. Zlobin Yu.A. (2018). Alhorytm otsinky vitalitetu osobyn roslyn i vitalitetnoi struktury fitopopuliacii [Algorithm for estimating the vitality of plant individuals and the vitality structure of phytopopulations]. *Chornomorskyi botanichnyi zhurnal – Black Sea Botanical Journal*. Tom 14, № 3. S. 213–226. [in Ukrainian].

27. Lysiaskyi O.L. (2018). Efektyvnist udobrennia syderalnykh kultur na chornozemі opidzolenomu Pravoberezhnoho Lisostepu Ukrainy [Efficiency of fertilisation of green manure crops on podzolised chernozem of the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine]: dys. ... kand. s.-h. nauk : 06.01.04 / Lysiaskyi Oleksandr Leonidovych; Nats. akad. ahrar. nauk Ukrainy, Nats. nauk. tsentr «In-t hruntoznavstva ta ahrokhimii im. O. N. Sokolovskoho». Kharkiv, 246 p [in Ukrainian].
28. Bhogal A., White C., Morris N. (2018). Project Report №. 620 Maxi Cover Crop: Maximising the benefits from cover crops through species selection and crop management. AHDB Cereals & Oilseeds is a part of the Agriculture and Horticulture Development Board (AHDB), 111 pp.
29. Quintarelli V., Radicetti E., Allevato E., Stazi S.R., Haider G., Abideen Z., Bibi S., Jamal A., Mancinelli R. (2022). Cover Crops for Sustainable Cropping Systems: A Review. *Agriculture*. Vol. 12. 2076.
30. White C.A., Holmes H.F., Morris N.L., Stobart R.M. (2016). A review of the benefits, optimal crop management practices and knowledge gaps associated with different cover crop species. *Research Review* №. 90. AHDB Cereals & Oilseeds, 90 p.

Цицюра Я.Г. Особливості формування кореневої системи та кореневої біомаси редьки олійної залежно від агротехнологічних параметрів конструювання її ценозу

Метою досліджень було встановити особливості формування архітекtonіки кореневої системи редьки олійної та рівень біопродуктивності цього процесу залежно від агротехнологічних варіантів конструювання її агрофітоценозу.

Методи. Дослідження було проведено впродовж 2018–2023 років на базі дослідного поля Вінницького НАУ на сірих лісових ґрунтах з середнім потенціалом родючості. Повторність у досліді чотирьохразова. Розміщення варіантів – систематичне у два яруси. Дослід передбачав вивчення таких факторів: А – річні умови періоду вегетації, В – норма висіву, С – спосіб сівби, D – удобрення.

Результати. Встановлена можливість агротехнологічного корегування морфологічного розвитку кореневої системи редьки олійної у орному горизонті (0–30 см) за комплексного поєднання норми висіву, способу сівби і удобрення на стадії припосівного конструювання агрофітоценозу редьки олійної. Доведено послідовне і стале зростання індивідуального морфологічного і вагового розвитку кореневої системи рослин за збільшення площі живлення та оптимізації мінерального живлення за рахунок внесення добрив в інтервалі від 30 до 90 кг/га діючої речовини. Встановлено оптимальні варіанти конструювання агроценозу редьки олійної для досягнення максимального рівня сформованої кореневої біомаси – відповідно за 2,0 млн схожих насінин/га за звичайної рядкової сівби на фоні $N_{90}P_{90}K_{90}$ та у варіанті з нормою висіву 1,5 млн схожих насінин/га за широкорядної сівби на тому ж фоні мінерального живлення.

Висновки. Технологічно оптимальні морфологічні та вагові параметри кореневої системи редьки олійної, які дозволяють сформувати максимальну кореневу біомасу цінну з позиції сидерального та біоорганічного застосування редьки олійної складаються у двох технологічних варіантах конструювання її агроценозів на сірих лісових ґрунтах в умовах нестійкого зволоження: у варіантах звичайної рядкової сівби з нормою висіву 2,0 млн схожих насінин/га на фоні $N_{90}P_{90}K_{90}$ – 10,70 т/га та за широкорядної сівби нормою висіву 1,5 млн схожих насінин/га на фоні $N_{90}P_{90}K_{90}$ – 10,82 т/га.

Ключові слова: архітекtonіка та морфометрія коренів, біопродуктивність, агроценоз, коренева біомаса.

Tsytsyura Ya.G. Features of formation of the root system and root biomass of oil radish depending on agrotechnological parameters of its cenosis design

The aim of the research was to determine the peculiarities of formation of the architectonics of the root system of oil radish and the level of bioproductivity of this process depending on the agrotechnological options for the design of its agrophytocenosis.

Methods. The study was conducted during 2018–2023 on the basis of the experimental field of Vinnytsia NAU on grey forest soils with medium fertility potential. The experiment was replicated four times. The arrangement of variants was systematic in two tiers. The experiment involved the study of the following factors: A – annual conditions of the growing season, B – seeding rate, C – sowing method, D – fertilisation.

Results. The possibility of agrotechnological correction of the morphological development of the root system of oil radish in the arable horizon (0–30 cm) with a complex combination of seeding rate, sowing method and fertilisation at the stage of pre-sowing construction of oil radish agrophytocenosis was established. Consistent and sustainable growth of individual morphological and weight development of the root system of plants with an increase in the feeding area and optimisation of mineral nutrition by fertilisation in the range of 30 to 90 kg/ha of active substance was proved. The optimal variants of designing the agrocenosis of oil radish to achieve the maximum level of formed root biomass were established - respectively, at 2,0 million germinating seeds/ha under conventional row sowing on the background of $N_{90}P_{90}K_{90}$ and in the variant with a sowing rate of 1,5 million germinating seeds/ha under wide-row sowing on the same background of mineral nutrition.

Conclusions. Technologically optimal morphological and weight parameters of the root system of oil radish, which allow to form the maximum root biomass valuable from the point of view of green manure and bioorganic use of oil radish, are formed in two technological variants of designing its agrocenoses on grey forest soils under conditions of unstable moisture: in the variants of conventional row sowing with a seeding rate of 2,0 million germinating seeds/ha on the background of $N_{90}P_{90}K_{90}$ – 10,70 t/ha and in the variants of wide-row sowing with a seeding rate of 1,5 million germinating seeds/ha on the background of $N_{90}P_{90}K_{90}$ – 10,82 t/ha.

Key words: root architecture and morphometry, bioproductivity, agrocenosis, root biomass.