УДК 631.52:633.853.494 DOI: 10.36710/IOC-2025-38-12

ФОТОСИНТЕТИЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ ПОСІВІВ РІПАКУ ОЗИМОГО В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД АГРОТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРИЙОМІВ

С. С. Юрчук

Інститут кормів та сільського господарства Поділля Національної академії аграрних наук України

У статті представлено результати польових досліджень (2010–2014 рр.) з оцінки фотосинтетичного потенціалу озимого ріпаку (*Brassica napus* L.) за різних норм висіву (0,4–1,0 млн/га), способів сівби, рівнів мінерального живлення та генотипів. Найвищий фотосинтетичний потенціал (2,497 млн м²·діб/га) досягнуто за умов рядкового посіву, повного агрофону і густоти 0,8–1,0 млн/га. Гібрид Ексагон перевищував сорт Антарія за фотосинтетичною продуктивністю та адаптивністю. Математичне моделювання дозволило кількісно оцінити індивідуальний і синергічний вплив досліджуваних чинників, побудувати регресійну модель фотосинтетичного потенціалу. Установлено, що поєднання густоти посіву з агрофоном і способом сівби забезпечує підвищену ефективність фотосинтетичної діяльності.

Ключові слова: ріпак озимий, фотосинтетичний потенціал, технологічні прийоми, норма висіву, агрофон, генотип, математичне моделювання.

Вступ. Формування високої урожайності озимого ріпаку (*Brassica napus l.*) значною мірою обумовлене ефективністю фотосинтетичних процесів, які визначають інтенсивність нагромадження органічної речовини впродовж вегетації. у цьому контексті ключову роль відіграє листкова поверхня, яка є провідною морфофункціональною одиницею фотосинтетичного апарату, забезпечуючи поглинання світлової енергії та асиміляцію вуглекислого газу (Koloyanidi, 2020; Ishchenko, 2021). Узагальненими показниками, що характеризують стан фотосинтетичної системи, є площа листя, фотосинтетичний потенціал (фп) та продуктивність фотосинтезу, що в сукупності відображають рівень активності асиміляційного апарату (Borysenko, 2021; Marchenko et al. 2020).

Фотосинтетичний потенціал визнано базовим критерієм оцінки продуктивності сільськогосподарських культур, що інтегрує ефективність асиміляції CO_2 у часі та просторі. У ріпаку озимого, як культури з високим темпом біомасоутворення, ФП значною мірою варіює залежно від технологічних чинників, таких як густота стояння, спосіб сівби та рівень мінерального живлення. Зокрема, у Kappen L et al. (Kappen et al., 1998) встановлено, що внесення підвищених норм азоту подовжує період активного фотосинтезу та стимулює ріст листкової поверхні, що забезпечує приріст урожайності до 16%. Дослідження Gammelvind L. et al. (Gammelvind et al., 1996) підтверджують лінійну залежність фотосинтетичної активності від вмісту азоту в тканинах, акцентуючи на компенсаторній ролі стручків у періоді зниження листкової

Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

*Corresponding author

асиміляції.

Liu T et al. (Liu et al., 2018), Li X et al. (Li et al., 2015) звернули увагу на координаційну функцію накопиченого азоту у процесі формування листкової поверхні та підтримання фотосинтетичної здатності, що є критично важливим у ранньовесняний період росту. Застосування додаткових агротехнічних заходів, таких як внесення добрив після періодів зниженого фотонного потоку (туману, смогу), дозволяє частково компенсувати втрати фотосинтетичної продуктивності(Cong et al. 2020; Spasibionek 2024; Zhao 2023).

У свою чергу, дослідження Liu Z-G et al. (Liu et al. 2016) на основі протеомного аналізу виявили негативний вплив низьких температур на фотохімічну ефективність, що свідчить про вразливість культури до абіотичних стресів у період перезимівлі.

Низка сучасних праць (Dąbrowski et al. 2024; Flexas et al. 2020; Xu et al. 2017; Junk et al. 2024) демонструє значні втрати фотосинтетичного потенціалу та урожайності під впливом граду, приморозків та інших несприятливих погодних явищ. Водночас, Dellero Y et al. (Dellero et al. 2021) зафіксували стабільність фотосинтетичних параметрів на різних етапах онтогенезу, проте із суттєвою варіабельністю показників водоспоживання. Дослідження Stachurska J et al. (Stachurska et al. 2022), Wang C et al. (Wang et al. 2023) підтверджують позитивний вплив інтегрованих агротехнічних прийомів (глибокого розпушення, регуляторів росту, біостимуляторів) на фотосинтетичну ефективність та адаптивність озимого ріпаку.

Водночас, більшість досліджень не враховують комплексну дію таких чинників, як норма висіву, спосіб сівби та рівень мінерального живлення в умовах Лісостепу України, що підтверджує потребу у дослідженні інтегрального впливу агротехнічних параметрів на фотосинтетичний потенціал ріпаку озимого в конкретних ґрунтово-кліматичних умовах регіону. У дослідженнях Bakhmat MI and Sendetsky IV (Bakhmat, Sendetsky 2020), Zabarnyi O (Zabarnyi 2023), Topchii O et al. (Topchii et al. 2022), Wang J (Wang 2025), Yurchuk S (Yurchuk 2020) розглянуто вплив окремих технологічних прийомів на ріст і продуктивність культури, однак комплексна оцінка фотосинтетичного потенціалу як інтегрального показника ефективності агротехнологій залишається малодослідженою.

Таким чином, встановлення закономірностей формування фотосинтетичного потенціалу озимого ріпаку залежно від поєднання норми висіву, способу сівби та агрофону є актуальним науковим завданням, що має практичне значення для підвищення біопродуктивності агроценозів у зоні Лісостепу.

Метою дослідження є встановлення закономірностей зміни фотосинтетичного потенціалу посівів ріпаку озимого залежно від технологічних прийомів вирощування (норми висіву, способу сівби, рівня мінерального живлення) з метою оптимізації асиміляційної здатності агроценозу та підвищення біопродуктивності культури.

У межах дослідження поставлено завдання проаналізувати динаміку фотосинтетичного потенціалу ріпаку озимого на різних етапах органогенезу залежно від способу сівби, густоти стояння рослин та рівня мінерального живлення; визначити вплив регулятора росту у поєднанні з мінеральним живленням на фотосинтетичну активність сортових і гібридних форм ріпаку

© С. С. Юрчук

озимого; здійснити порівняльну оцінку реакції сорту Антарія та гібриду Ексагон на зміну технологічних чинників; встановити оптимальні комбінації агротехнічних прийомів, що забезпечують найвищі значення ФП та сприяють ефективному накопиченню біомаси; розробити багатофакторну регресійну модель для прогнозування рівня фотосинтетичного потенціалу посівів залежно від комплексу технологічних чинників.

Матеріали та методи досліджень. Дослідження проводилися упродовж 2010–2014 рр. на дослідних полях Інституту кормів та сільського господарства Поділля НААН України, що розташовані в зоні Центрального Лісостепу. Агрокліматичні умови регіону характеризуються достатнім зволоженням, помірним температурним режимом і переважанням темно-сірих опідзолених ґрунтів, які забезпечують сприятливий фон для вирощування озимого ріпаку.

У польовому експерименті вивчено вплив норм висіву (0,4; 0,6; 0,8; 1,0 млн схожих насінин/га), способу сівби (звичайний рядковий – 15 см та широкорядний – 45 см), а також трьох рівнів мінерального живлення (контроль; добрива $N_{120}P_{60}K_{90}$; добрива + регулятор росту Карамба – 1,0 л/га) на формування фотосинтетичного потенціалу озимого ріпаку. У дослідах застосовано два генотипи культури – сорт Антарія та гібрид Ексагон.

Площу листкової поверхні обліковували в динаміці на ключових фазах органогенезу (розетка, бутонізація, повне цвітіння, початок дозрівання) шляхом визначення листкової площі одного рослинного екземпляра та екстраполяції на одиницю площі.

Лабораторні обліки включали визначення схожості насіння, польової схожості, збереження рослин після зими та маси сухої речовини. Статистичну обробку результатів виконано методами дисперсійного та регресійного аналізу з використанням пакетів *Excel* і *Statistica 10.0*. Для візуалізації ступеня впливу чинників використовували графоаналітичні методи, зокрема побудову стовпчастих діаграм факторної важливості.

Методичне забезпечення експерименту було розроблено відповідно до науково-методичних рекомендацій, що регламентують проведення польових досліджень (Tymoshenko et al. 2024; Ermantraut et al. 2008).

Результати досліджень та їх обговорення. Фотосинтетичний потенціал є одним із ключових показників, що характеризує ефективність ростових процесів та формування продуктивності сільськогосподарських культур. У ріпаку озимого, як культури з високим рівнем біомасоутворення, він безпосередньо залежить від особливостей технології вирощування, включаючи норму висіву, спосіб сівби та забезпечення елементами мінерального живлення. Формування максимальної площі асиміляційної поверхні впродовж вегетації є передумовою інтенсивного накопичення сухої речовини, закладання генеративних органів та реалізації потенціалу врожайності. У цьому контексті доцільним є оцінка динаміки фотосинтетичного потенціалу на різних етапах органогенезу культури, з урахуванням технологічних чинників. Представлена таблиця відображає середні значення фотосинтетичного потенціалу озимого ріпаку сорту Антарія за 2010–2014 рр., залежно від способу сівби, норми висіву та рівня мінерального живлення, включаючи варіант із застосуванням регулятора росту Карамба.

© С. С. Юрчук

Таблиця 1

Фотосинтетичний потенціал ріпаку озимого сорту Антарія залежно від способів сівби, норм висіву та мінеральних добрив, млн. м^2 діб/га (у середньому за 2010-2014 рр.)

Фаза розвитку рослин озимого ріпаку	Норма висіву, млн н./га	Широкорядний спосіб посіву			Звичайний рядковий спосіб посіву		
		Контроль	$N_{120}P_{60}K_{90}$	$N_{120}P_{60}K_{90}$ + Карамба	Контроль	$N_{120}P_{60}K_{90}$	$N_{120}P_{60}K_{90}$ + Карамба
Утворення розетки листя (6-8 лист.)	0,4	0,317	0,678	0,715	0,457	0,749	0,818
	0,6	0,308	0,672	0,708	0,452	0,733	0,849
	0,8	0,301	0,666	0,705	0,445	0,724	0,827
	1	0,295	0,661	0,7	0,432	0,712	0,825
Бутоні-зація	0,4	0,391	0,694	0,795	0,575	0,785	0,884
	0,6	0,393	0,685	0,779	0,564	0,799	0,879
	0,8	0,361	0,68	0,748	0,552	0,757	0,869
	1	0,343	0,648	0,727	0,545	0,728	0,857
Повне цвітіння	0,4	1,117	1,202	1,235	1,597	1,782	1,799
	0,6	1,122	1,242	1,267	1,694	1,877	1,897
	0,8	1,145	1273	1,284	1,773	1,962	1,981
	1	1,161	1,282	1,297	1,825	1,988	1,998
Початок дозрівання	0,4	1,39	1,528	1,656	2,234	2,452	2,467
	0,6	1,264	1,385	1,458	2,218	2,469	2,476
	0,8	1,097	1,298	1,238	2,188	2,47	2,49
	1	0,803	1,178	1,199	2,158	2,461	2,469

Аналіз отриманих даних засвідчив чітку залежність фотосинтетичного потенціалу ріпаку озимого сорту Антарія від поєднання способу сівби, норми висіву та рівня мінерального живлення. Звичайний рядковий спосіб сівби стабільно забезпечував вищі показники фотосинтетичного потенціалу у всіх фазах розвитку рослин порівняно з широкорядним. Застосування мінеральних добрив ($N_{120}P_{60}K_{90}$), особливо у поєднанні з регулятором росту Карамба, сприяло істотному підвищенню ефективності фотосинтетичної діяльності – найбільші значення фіксувалися у фазах цвітіння та початку дозрівання (до 2,49 млн м²×діб/га). Норма висіву 0,6–0,8 млн/га у поєднанні з інтенсивним агрофоном виявилася оптимальною для реалізації потенціалу асиміляційної поверхні. Встановлені закономірності можуть бути використані для удосконалення елементів технології вирощування, спрямованих на підвищення фотосинтетичної продуктивності та врожайності посівів ріпаку озимого.

Фотосинтетичний потенціал сільськогосподарських культур є критерієм оцінки їхньої здатності до накопичення органічної маси та формування врожайності за рахунок інтенсивності асиміляційних процесів. Для ріпаку озимого, як енергомісткої культури з тривалою вегетацією, особливо важливим є формування максимальної асиміляційної поверхні на ранніх етапах розвитку та її стійке функціонування впродовж критичних фаз органогенезу. У цьому контексті ефективність фотосинтетичної діяльності істотно залежить від агротехнічних факторів, зокрема способу сівби, густоти стояння рослин (норми висіву) та рівня мінерального живлення. Особливе значення має вивчення

© С. С. Юрчук

динаміки фотосинтетичного потенціалу у високопродуктивних гібридів, таких як Ексагон, які відзначаються інтенсивністю росту та високим коефіцієнтом використання елементів живлення. Наведені в таблиці результати демонструють середні значення фотосинтетичного потенціалу гібриду ріпаку озимого Ексагон упродовж 2010–2014 років залежно від технологічних параметрів вирощування.

Таблиця 2

Фотосинтетичний потенціал ріпаку озимого гібриду Ексагон залежно від способів сівби, норм висіву та мінеральних добрив, млн. м^2 діб/га (у середньому за 2010-2014 рр.)

Фаза розвитку рослин озимого ріпаку	Норма висіву, млн.н./га	Широкорядний спосіб посіву			Звичайний рядковий спосіб посіву		
		Контроль	$N_{120}P_{60}K_{90}$	$N_{120}P_{60}K_{90}$+ Карамба	Контроль	$N_{120}P_{60}K_{90}$	$N_{120}P_{60}K_{90}$+ Карамба
Утворення розетки листя (6-8 листок)	0,4	0,349	0,728	0,746	0,492	0,779	0,845
	0,6	0,338	0,702	0,736	0,484	0,759	0,871
	0,8	0,321	0,691	0,726	0,467	0,744	0,854
	1	0,315	0,677	0,718	0,432	0,732	0,845
Бутонізація	0,4	0,435	0,744	0,825	0,591	0,821	0,914
	0,6	0,413	0,715	0,804	0,582	0,812	0,886
	0,8	0,39	0,701	0,788	0,574	0,787	0,879
	1	0,372	0,689	0,759	0,561	0,756	0,868
Повне цвітіння	0,4	1,132	1,244	1,261	1,623	1,797	1,839
	0,6	1,149	1,266	1,289	1,704	1,897	1,927
	0,8	1,169	1293	1,299	1,794	1,984	1,996
	1	1,187	1,301	1,329	1,851	2,005	2,036
Початок дозрівання	0,4	1,429	1,552	1,688	2,258	2,464	2,471
	0,6	1,283	1,408	1,494	2,264	2,478	2,482
	0,8	1,124	1,338	1,277	2,235	2,479	2,497
	1	0,846	1,198	1,229	2,172	2,469	2,479

За результатами дослідження встановлено, що фотосинтетичний потенціал ріпаку озимого гібриду Ексагон демонструє високу варіабельність залежно від способу сівби, норми висіву та рівня мінерального живлення. Звичайний рядковий спосіб сівби стабільно забезпечував перевагу в асиміляційній здатності посівів у всіх фазах розвитку рослин. Найбільші значення фотосинтетичного потенціалу спостерігались у фазі початку дозрівання при нормі висіву 0,8–1,0 млн насінин/га за умов повного агрофону (внесення добрив у поєднанні з регулятором росту Карамба) – до 2,497 млн м²×діб/га. Застосування мінерального живлення значно покращувало фотосинтетичну продуктивність, а комбінація з регулятором росту дозволяла додатково підвищити показники в межах 4–6%. Показова також тенденція до зниження фотосинтетичного потенціалу за надмірного загущення (1,0 млн/га) в умовах широкорядного сівби, що свідчить про негативний ефект внутрішньопосівної конкуренції. Отримані результати підтверджують доцільність комплексного підходу до оптимізації параметрів сівби та удобрення для забезпечення максимальної фотосинтетичної активності високопродуктивних гібридів ріпаку

© С. С. Юрчук

озимого.

Аналізуючи динаміку фотосинтетичного потенціалу ріпаку озимого сортотипу Антарія та гібриду Ексагон за однакових агротехнічних умов, виявлено чіткі генотипові відмінності у формуванні асиміляційної здатності посівів. Упродовж усіх фаз онтогенезу, від утворення розетки до початку дозрівання, гібрид Ексагон переважав сорт Антарія за величиною фотосинтетичного потенціалу при будь-якому поєднанні способу сівби, норми висіву та агрофону.

У фазі утворення розетки листя, при нормі висіву 0,8 млн насінин/га та внесенні $N_{120}P_{60}K_{90}$ + Карамба, фотосинтетичний потенціал гібриду Ексагон становив 0,854 млн м²×діб/га (рядковий спосіб сівби), що перевищувало аналогічне значення сорту Антарія (0,827 млн м²×діб/га) на 3,3%. Перевага гібриду зберігалася і в подальших фазах: у фазі бутонізації різниця сягала 1,1–3,5%; у фазі повного цвітіння – 1,5–2,0%, а у фазі початку дозрівання – 0,7–1,1%, залежно від агрофону.

Максимальні значення ФП для обох генотипів спостерігались на завершальному етапі вегетації. Для сорту Антарія цей показник досягав 2,49 млн м²×діб/га, тоді як у гібрида Ексагон – 2,497 млн м²×діб/га, що вказує на підвищену стійкість останнього до зміни густоти та агрофону. Слід зауважити, що за умов звичайного рядкового способу сівби й застосування повного мінерального живлення з регулятором росту, гібрид Ексагон демонстрував більш ефективну реалізацію асиміляційного потенціалу навіть за загущених посівів (1,0 млн/га), тоді як у сорту Антарія на цьому рівні густоти спостерігалося зниження ФП.

І в сорту, і в гібриду спостерігається схожа тенденція: нарощування фотосинтетичного потенціалу до фази дозрівання з максимальними темпами між фазами бутонізації та цвітіння. Проте в гібрида Ексагон ці темпи є вищими, що свідчить про більшу інтенсивність метаболічних процесів і ефективніше використання площі листкової поверхні.

Таким чином, гібрид Ексагон продемонстрував вищу реакційну здатність на оптимізацію технологічних чинників, зокрема внесення мінерального живлення у поєднанні з регулятором росту, а також кращу здатність до компенсації ефекту загущення. Сорт Антарія, хоча й формував достатньо високі показники ФП, виявляв більшу чутливість до змін густоти сівби. Виявлені відмінності між генотипами слугують підґрунтям для диференційованого підходу до розроблення елементів технології вирощування ріпаку озимого з урахуванням біологічних особливостей сорту чи гібриду.

З огляду на зазначені генотипові особливості та варіативність фотосинтетичної реакції рослин на зміну технологічних чинників, постає необхідність у формалізації отриманих результатів у вигляді математичної моделі, що дає змогу узагальнити експериментальні дані, виявити закономірності та забезпечити науково обґрунтоване прогнозування рівня фотосинтетичного потенціалу за різних комбінацій агрофонів, норм висіву, способів сівби та генотипів.

У результаті багаторічних польових досліджень (2010–2014 рр.) із вивчення впливу технологічних чинників на фотосинтетичний потенціал ріпаку озимого було отримано достатній масив даних для формалізації залежностей у вигляді багатофакторної регресійної моделі. Така модель дозволяє кількісно

© С. С. Юрчук

оцінити індивідуальний та інтегральний вплив норм висіву, способу сівби, агрофону (рівня мінерального живлення), генотипу, а також взаємодії між ними.

Формалізоване рівняння моделі:

$$Y=a+b_1X_1+b_2X_2+b_3S+b_4G+b_5(X_1\times X_2)+b_6(X_1\times S)+b_7(X_1\times G)+b8(X_2\times S), \quad (1)$$

де Y – фотосинтетичний потенціал (млн м²·діб/га);

X_1 – норма висіву (млн схожих насінин/га);

X_2 – агрофон:

1 – контроль (без добрив);

2 – мінеральне живлення $N_{120}P_{60}K_{90}$;

3 – $N_{120}P_{60}K_{90}$ + регулятор росту Карамба;

S – спосіб сівби (0 – широкорядний, 1 – звичайний рядковий);

G – генотип (0 – сорт Антарія, 1 – гібрид Ексагон);

b_i – коефіцієнти регресії, які відображають вагу відповідного чинника або взаємодії у зміні ФП.

Спостережена варіабельність ФП залежно від агротехнічних умов і біологічних особливостей культури обґрунтовує необхідність математичного моделювання з метою прогнозування реакції посівів на зміну технологічних параметрів. Для цього було сформовано масив експериментальних даних, які стали основою для побудови узагальненої регресійної моделі.

Таблиця 3

Вихідні дані для побудови регресійної моделі фотосинтетичного потенціалу (фаза повного цвітіння)

№	X_1 Норма висіву (млн/га)	X_2 Агрофон (1–3)	S Спосіб сівби (0 – широкорядний, 1 – рядковий)	G Генотип (0 – Антарія, 1 – Ексагон)	Y ФП, млн м²·діб/га
1	0,8	3	1	0	1,981
2	0,8	3	1	1	1,996
3	0,6	2	0	0	1,242
4	1,0	3	1	1	2,036
5	1,0	1	0	0	1,161
6	0,4	3	0	1	1,261
7	0,6	2	1	1	1,897
8	1,0	2	1	0	1,988
9	0,4	1	0	0	1,117
10	0,8	2	1	0	1,962
11	0,6	3	0	1	1,289
12	1,0	3	0	0	1,297

На основі наведених вихідних даних можливо здійснити побудову рівняння множинної регресії (2) з метою оцінки, як окремого впливу кожного фактора на рівень фотосинтетичного потенціалу, так і їх інтерактивного ефекту. Такий підхід дозволяє не лише інтерпретувати біологічну відповідь культури, а й адаптувати технологію вирощування до конкретних умов для досягнення максимального рівня продуктивності агроценозу.

$$Y=0,45+1,65X_1+0,62X_2+0,83S+0,77G+0,41(X_1\times X_2)+$$
$$+0,36(X_1\times S)+0,33(X_1\times G)+0,29(X_2\times S), \quad (2)$$

© С. С. Юрчук

де, базове значення (0,45) відображає фотосинтетичний потенціал у контрольному варіанті при мінімальній нормі висіву, широкорядному способі сівби та сорті Антарія.

Норма висіву має найбільший коефіцієнт (1,65), що свідчить про її домінуючий вплив на ФП: при збільшенні густоти на 1 млн/га, ФП зростає в середньому на 1,65 млн м²·діб/га.

Агрофон (0,62) та спосіб сівби (0,83) мають вагомий позитивний вплив: перехід до мінерального живлення та звичайного рядкового посіву суттєво підвищує інтенсивність фотосинтезу.

Генотиповий ефект (0,77) свідчить про перевагу гібриду Ексагон у здатності формувати вищий ФП.

Інтерактивні ефекти (від 0,29 до 0,41) підтверджують, що технологічні фактори не діють ізольовано. Наприклад, комбінація підвищеної норми висіву з високим агрофоном ($X_1 \times X_2$) чи зі звичайним посівом ($X_1 \times S$) істотно підсилює фотосинтетичну активність.

Виконаємо прогнозування фотосинтетичного потенціалу озимого ріпаку за умов:

- норма висіву $X_1 = 0{,}8$ млн схожих насінин/га;
- агрофон $X_2 = 3$ (повне мінеральне живлення $N_{120}P_{60}K_{90}$+ регулятор росту Карамба);
- спосіб сівби $S = 1$ (звичайний рядковий);
- генотип $G = 1$ (гібрид Ексагон).

Підставляємо числові значення в рівняння регресійної моделі для фотосинтетичного потенціалу:

$$Y=0{,}45+1{,}65\times0{,}8+0{,}62\times3+0{,}83\times1+0{,}77\times1+0{,}41\times(0{,}8\times3)+0{,}36\times(0{,}8\times1)+$$
$$+0{,}33\times(0{,}8\times1)+0{,}29\times(3\times1)=7{,}646 \text{ млн м}^2\cdot\text{діб/га}.$$

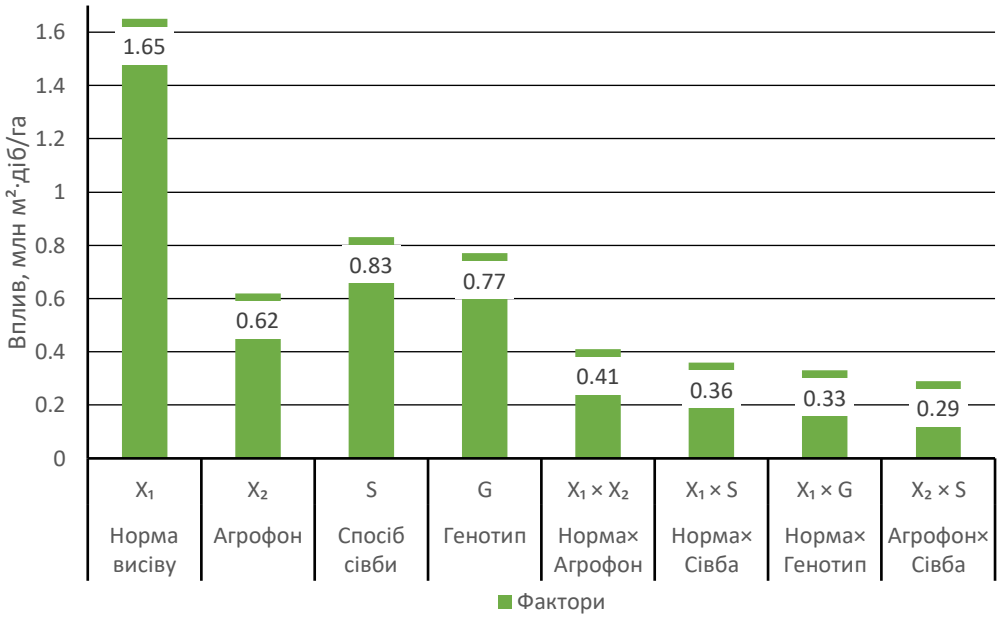
Отже, прогнозоване значення фотосинтетичного потенціалу за заданих умов становить 7,65 млн м²·діб/га. Отриманий результат відображає синергічний ефект сприятливої густоти посіву, достатнього рівня мінерального живлення та генетичного потенціалу гібриду. Зокрема, значення індивідуального коефіцієнта для норми висіву (1,65) вказує, що густота є найвпливовішим чинником у формуванні ФП. Проте, взаємодія із агрофоном і способом сівби значно посилює ефективність фотосинтетичної діяльності. Отримана модель підтверджує ефективність інтегрованого підходу до планування технології вирощування ріпаку озимого, орієнтованого на досягнення максимальної асиміляційної здатності посівів.

Для поглиблення інтерпретації результатів регресійного аналізу доцільним є використання візуального представлення ступеня впливу кожного з досліджуваних чинників. На рис. 1 представлено узагальнені результати кількісної оцінки впливу окремих технологічних прийомів (норма висіву, агрофон, спосіб сівби, генотип) та їх поєднань на рівень фотосинтетичного потенціалу ріпаку озимого. Значення коефіцієнтів регресійної моделі, відображені у вигляді стовпців, що відображають зміну ФП (у млн м²·діб/га) за одиничне збільшення відповідної змінної при фіксованих значеннях інших параметрів.

Як видно з рис. 1, норма висіву (X_1) має найвищу вагу серед усіх досліджуваних факторів (1,65), підтверджуючи провідну роль густоти стояння у формуванні асиміляційної поверхні. Суттєвий позитивний вплив також

© С. С. Юрчук

встановлено для способу сівби (0,83) та генотипу (0,77), що свідчить про перевагу рядкового способу посіву та високий генетичний потенціал гібридів. Водночас, розраховані значення коефіцієнтів комбінованих ефектів (від 0,29 до 0,41) доводять, що ефективність кожного окремого чинника зростає за умови його узгодженого застосування з іншими технологічними елементами. Зокрема, взаємодія норми висіву з агрофоном ($X_1 \times X_2$) та способом сівби ($X_1 \times S$) чинить істотне посилення на формування ФП.



Примітка: X_1 – норма висіву (млн схожих насінин/га); X_2 – агрофон: 1 – контроль (без добрив); 2 – мінеральне живлення $N_{120}P_{60}K_{90}$; 3 – $N_{120}P_{60}K_{90}$ + регулятор росту Карамба; S – спосіб сівби (0 – широкорядний, 1 – звичайний рядковий); G – генотип (0 – сорт Антарія, 1 – гібрид Ексагон);

Рис. 1. **Оцінка впливу агротехнічних факторів на фотосинтетичний потенціал ріпаку озимого**

Отже, підтверджується доцільність комплексного планування технології вирощування ріпаку озимого із врахуванням як індивідуальних, так і поєднаних ефектів основних агротехнічних факторів. Отримані результати узгоджуються з висновками вітчизняних і зарубіжних дослідників щодо значного впливу норм висіву, агрофону та способу сівби на фотосинтетичну активність і продуктивність посівів ріпаку. Зокрема, подібну тенденцію збільшення фотосинтетичного потенціалу за умов оптимального мінерального живлення і відповідної густоти рослинного покриву відзначено у працях Liu T. (Liu et al. 2018), Cong R. (Cong et al. 2020), а також в дослідженнях українських авторів Bakhmat MI and Sendetsky IV (Bakhmat, Sendetsky 2020) та інших. Узагальнення даних також підтверджує висновки Dellero Y. (Dellero et al. 2021) і Dąbrowski P. (Dąbrowski et al. 2024) про важливу роль адаптації фотосинтетичного апарату в умовах стресу та залежність його ефективності від агротехнологічних рішень.

Таким чином, результати дослідження доповнюють і розвивають наукову базу щодо оптимізації вирощування ріпаку озимого, сприяючи обґрунтуванню

© С. С. Юрчук

технологій, що забезпечують високий рівень асиміляційної здатності і стабільну урожайність культури.

Висновки. Узагальнення результатів багаторічних досліджень дозволило встановити закономірності формування фотосинтетичного потенціалу ріпаку озимого в залежності від технологічних прийомів вирощування та біологічних особливостей генотипів. Аналіз впливу норми висіву, агрофону, способу сівби й типу сорту чи гібриду дав змогу виявити основні фактори та їх комбінації, що забезпечують підвищення фотосинтетичної продуктивності посівів:

1. Встановлено, що фотосинтетичний потенціал ріпаку озимого суттєво залежить від поєднання технологічних чинників, зокрема норми висіву, способу сівби, рівня мінерального живлення та генотипу культури. Максимальні значення ФП досягались у фазі початку дозрівання за умов звичайного рядкового способу сівби, застосування повного агрофону ($N_{120}P_{60}K_{90}$ + регулятор росту Карамба) та густоти 0,8–1,0 млн схожих насінин/га.
2. Порівняльний аналіз сорту Антарія та гібриду Ексагон засвідчив перевагу останнього у формуванні фотосинтетичного потенціалу на всіх етапах органогенезу. Гібрид характеризувався вищою стабільністю показників за умов загущення та інтенсивного агрофону, що свідчить про його вищу адаптивність і ефективність засвоєння елементів живлення.
3. Математичне моделювання фотосинтетичного потенціалу дозволило кількісно оцінити прямий і комбінований вплив агротехнічних факторів. Найвагоміший вплив виявлено для норми висіву (1,65 млн м²•діб/га при збільшенні на 1 млн/га), а також значущу дію комбінацій норм висіву з агрофоном ($X_1 \times X_2$) та способом сівби ($X_1 \times S$), що свідчить про необхідність системного підходу до планування агроприйомів.
4. Побудована регресійна модель з високим ступенем відповідності результатам експерименту може бути використана як інструмент для оптимізації структури посівів ріпаку озимого та підвищення ефективності фотосинтетичної діяльності посівів у зоні Лісостепу України.

Доцільним є розширення досліджень у напрямі вивчення постфотосинтетичних процесів (транспорту та депонування асимілянтів), а також перевірка отриманих закономірностей в інших агрокліматичних зонах. Перспективним напрямом є використання моделі для управління посівами в системах точного землеробства.

Referenses

Bakhmat MI, Sendetsky IV (2020) Photosynthetic productivity of winter raps plants depending on sowing norms and application of Vermiodis growth regulator. Plant and Soil Science 11(3):51–60. DOI: 10.31548/agr2020.03.051.

Borysenko VV (2021) Influence of growing conditions on leaf surface formation and photosynthetic potential of sunflower hybrids. Taurian Scientific Herald117:16-21. DOI: 10.32851/2226-0099.2021.117.3.

Cong R, Liu T, Lu P, Ren T, Li X, Lu, Jianwei (2020) Nitrogen fertilization compensation the weak photosynthesis of oilseed rape (Brassca napus L.) under haze weather. Scientific Reports 10:4047. DOI: 10.1038/s41598-020-60695-y.

Dąbrowski P, Jełowicki Ł, Jaszczuk Z, Kryvoviaz O, Kalaji H (2024) Photosynthetic performance and yield losses of winter rapeseed (Brassica napus L. var. napus) caused by simulated hail. Plants 13:1785. DOI: 10.3390/plants13131785.

© С. С. Юрчук

Dellero Y, Jossier M, Bouchereau A , Hodges M, Leport L (2021) Leaf phenological stages of winter oilseed rape (Brassica napus L.) have conserved photosynthetic efficiencies but contrasted intrinsic water use efficiencies at high light intensities. Frontiers in Plant Science 12. DOI: 10.3389/fpls.2021.659439

Ermantraut V.R., Bobro M.A., Goptsii T.I. et al. (2008) Methods of scientific research in agronomy. KhNAU, Kharkiv.

Flexas J, Carriquí M (2020) Photosynthesis and photosynthetic efficiencies along the terrestrial plant's phylogeny: lessons for improving crop photosynthesis. The Plant Journal 101 (4): 964–978. DOI: 10.1111/tpj.14651.

Gamayunova VV, Garo IM (2021) Influence of cultivation factors on the growth of aboveground biomass by winter rape in the conditions of the Forest-Steppe of Ukraine. Agrarian innovations 7:105-109. DOI: 10.32848/agrar.innov.2021.7.18.

Gammelvind L, Schjoerring J, Mogensen V, Jensen C, Bock J (1996) Photosynthesis in leaves and siliques of winter oilseed rape (Brassica napus L.). Plant and Soil 186:227-236. DOI: 10.1007/BF02415518.

Ishchenko VA (2021) Influence of mineral fertilization level on photosynthetic potential and productivity of spring triticale varieties in the Northern Steppe. Taurian Scientific Herald 121:53–57. DOI: 10.32851/2226-0099.2021.121.7.

Junk J, Torres A, El Jaroudi M, EickermannM (2024) Impact of climate change on the phenology of winter oilseed rape (Brassica napus L.). Agriculture 14:1049. DOI: 10.3390/agriculture14071049.

Kappen L, Hammler A, Schultz G (1998) Seasonal changes in the photosynthetic capacity of winter rape plants under different nitrogen regimes measured in the field. Journal of Agronomy and Crop Science 181(3): 179–187. DOI: 10.1111/j.1439-037x.1998.tb00415.x.

Koloyanidi NA (2020) Leaf area and photosynthetic potential of the chickpea crops for cultivation in South of Ukraine. Interagency thematic scientific collection «Irrigated agriculture» 73:219–223. DOI: 10.32848/0135-2369.2020.73.43.

Li X, Yang T, Nie Z, Chen G, Hu L, Wang R (2015) A functional leaf may represent the assimilate accumulation characteristics of the whole seedling plant in winter oilseed rape (Brassica napus L.). Crop and Pasture Science 66:849-856. DOI: 10.1071/CP14224.

Liu T, Ren T, White P, Cong R, Lu J (2018) Storage nitrogen coordinates leaf expansion and photosynthetic capacity in winter oilseed rape (Brassica napus L.). Journal of experimental botany 69:2995–3007. DOI: https://doi.org/10.1093/jxb/ery134

Liu Z-G, Yuan J-H, Sun W-C, Zeng X-C, Fang Y, Wang Z-J, Wu J-Y, Fang Y, Li X-C, Mi C (2016) Differential proteomic analysis and photosynthetic characteristics of winter rapeseed under low temperature stress. Acta Agronomica Sinica 42:1541. DOI: 10.3724/SP.J.1006.2016.01541.

Marchenko TYu, Vozhegov RA, Lavrynenko, YuO, Khomenko T M (2020) Features of the formation of photosynthetic potential and seed yield of maize parental components under irrigation and the use of a growth stimulator. Plant Varieties Studying and Protection, 16(2):191–198. DOI: 10.21498/2518-1017.16.2.2020.209239.

Spasibionek S, Wielebski F, Liersch A, Walkowiak M (2024) The influence of nitrogen and sulfur fertilization on oil quality and seed meal in different genotypes of

© С. С. Юрчук

winter oilseed rape (Brassica napus L.). Agriculture 14(8):1232. DOI: 10.3390/agriculture14081232.

Stachurska J, Rys M, Pociecha E, Kalaji HM, Dąbrowski P, Oklestkova J, Jurczyk B, Janeczko A. (2022) Deacclimation-induced changes of photosynthetic efficiency, brassinosteroid homeostasis and bri1 expression in winter oilseed rape (Brassica napus L.) – Relation to Frost Tolerance. Int. J. Mol. Sci 23:5224. DOI: 10.3390/ijms23095224.

Topchii O, Korol L, Dikhtiar I, Ivanytska A, Bezprozvana I (2022) Determination of biochemical indicators of winter rape seeds under different growing conditions. Plant Varieties Studying and Protection 18(4):283–292. DOI: 10.21498/2518-1017.18.4.2022.273990.

Tymoshenko II, Mayshchuk ZM, Kosylovych GO (2004) Fundamentals of scientific research in agronomy: teaching manual. Lviv.

Wang C, Zongkai W, Ali Mahmoud El-B, Batool M, Anwar S, Wang X, Bai M, You Y, Wang B, Wang J, Xu Z, Kuai J, Zhou G (2023) Moderately deep tillage enhances rapeseed yield by improving frost resistance of seedling during overwintering. Field Crops Research 304:109173. DOI: 10.1016/j.fcr.2023.109173.

Wang J, Wang H, Xin L, Jing C, Xiaoyan S, Jianghui S, Weidi L, Wenxu Z (2025) Estimating photosynthetic characteristics of forage rape by fusing the sensitive spectral bands to combined stresses of nitrogen and salt. Frontiers in Plant Science 16 DOI: 10.3389/fpls.2025.1547832.

Xu Y-Z, Zeng X-C, Zhang F-Q, Sun J, Sun W-C, Wu J-Y, Fang Y, Liu Z-G, Sun B-L (2017).Response of leaf anatomical structure and photosynthetic characteristics of winter turnip rape (Brassica rapa L.) to low temperature before winter. Acta Agronomica Sinica 43:432-441. DOI: 10.3724/SP.J.1006.2017.00432.

Yurchuk S (2020) Yield and quality of winter rape seeds depending on the method of sowing and sowing norms in the conditions of the right bank. Feeds and Feed Production 89:102-111. DOI: 10.31073/kormovyrobnytstvo202089-10.

Zabarnyi O (2023) Influence of seeding rates on the formation of productivity of winter rape agrocenoses (Brassica napus L. Oleifera). Agroecological journal 3:128–135. DOI: 10.33730/2077-4893.3.2023.287771.

Zhao D, Cao Z, Chen L, Zhang G, Zhu Y, Han J, (2023) Optimising the effect of nitrogen on winter oilseed rape grain yield in China: A meta-analysis. European Journal of Agronomy 144:126755. DOI: 10.1016/j.eja.2023.126755.

PHOTOSYNTHETIC POTENTIAL OF WINTER RAPE CROPS DEPENDING ON AGROTECHNOLOGICAL METHODS

S. S. Yurchuk

Institute of Feed Research and Agriculture of Podillia of NAAS

The article presents the results of long-term field studies (2010-2014) aimed at establishing the patterns of formation of the photosynthetic potential of winter rape (Brassica napus L.) depending on the technological methods of cultivation, in particular, the method of sowing, seeding rate, level of mineral nutrition and type of genotype (variety Antaria and hybrid Exagon). The aim of the study is to establish the patterns of changes in the photosynthetic potential of winter rape crops under the influence of cultivation techniques to optimise the assimilation capacity of agrocenosis and increase the bioproductivity of the crop. It has been proven that photosynthetic potential

© С. С. Юрчук

is a sensitive indicator of the assimilation capacity of crops and reliably reflects the reaction of the crop to changes in agronomic parameters. The highest values of photosynthetic potential (up to 2.497 million m²×day/ha) were observed at the final stage of vegetation under conditions of conventional row sowing, $N_{120}P_{60}K_{90}$ application in combination with the growth regulator Karamba and a sowing rate of 0.8-1.0 million germinating seeds/ha. It was found that the Exagon hybrid demonstrates more stable photosynthetic productivity and better adaptability to thickening. Mathematical modelling made it possible to quantify the individual and synergistic effects of the studied factors. The highest regression coefficient was obtained for the seeding rate, which emphasises its decisive role in the formation of the assimilation surface. It has been established that the combination of sowing density with agrophonics and sowing method provides increased efficiency of photosynthetic activity. The proposed model can be used as a tool for agrarian forecasting and optimisation of winter rape cultivation technologies in the forest-steppe of Ukraine. The obtained results form the scientific basis for further research in the direction of predicting crop productivity under variable agroclimatic conditions and the introduction of precision agriculture elements.

Key words: winter rapeseed, photosynthetic potential, technological techniques, seeding rate, agrobackground, genotype, mathematical modeling.

© С. С. Юрчук