



УДК 635.004:635.5

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.16.2026.21>

ПРОДУКТИВНІСТЬ РУКОЛИ ЗА РІЗНИХ ВАРІАНТІВ ДОСВІЧУВАННЯ В КУЛЬТИВАЦІЙНИХ СПОРУДАХ ЗАКРИТОГО ҐРУНТУ

**Б. В. Матвійчук¹, Н. Г. Матвійчук², Л. Г. Савченко³,
О. О. Любарська⁴, Б. Р. Костенко⁵**

*Зростання ролі технології контролюваного середовища вирощування та потреба в оптимізації світлового режиму як ключового чинника регуляції фотосинтетичної продуктивності листових овочевих культур визначають сучасну наукову й практичну значущість досліджень у цьому напрямі. Рукола (*Eruca sativa* L.) характеризується високою пластичністю до спектрального складу світла, що робить її перспективним об'єктом для вдосконалення режимів світлодіодного досвічування з метою підвищення врожайності та збереження якості продукції в умовах закритої*

¹ кандидат сільськогосподарських наук,
доцент кафедри ботаніки,
біоресурсів та збереження біорізноманіття
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: bogdanmatviychuk@ukr.net
ORCID: 0000-0002-7872-2420

² кандидат сільськогосподарських наук,
доцент кафедри ботаніки,
біоресурсів та збереження біорізноманіття
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: natamatviychuk400@ukr.net
ORCID: 0000-0003-2226-814X

³ кандидат історичних наук,
доцент кафедри машиновикористання та сервісу технологічних систем
(Поліський національний університет, м. Житомир)
e-mail: slgu@ukr.net
ORCID: 0000-0002-7689-4982

⁴ здобувач першого бакалаврського рівня вищої освіти
ОП «Тепличне господарство»
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: lybik@i.ua
ORCID: 0009-0009-1714-7037

⁵ здобувач першого бакалаврського рівня вищої освіти
ОП «Тепличне господарство»
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: kostenko.bogdan2004@gmail.com
ORCID: 0009-0005-5208-7034

того ґрунту. Дослідження проводили у 2023–2024 рр. в теплиці ФОП «Green Farm» за гідропонної технології вирощування з повним контролем параметрів мікроклімату та живлення. Об'єктами були п'ять сортів руколи: Грація, Триція, Агрис, Либідь, Сицилія. Вивчали вплив трьох варіантів LED-освітлення (460–620–660 нм) з постійною часткою синього світла (25%) та різним співвідношенням червоних ділянок спектра. Контролем слугували рослини, вирощені за природного освітлення. Оцінювали біометричні показники, площу листової поверхні та накопичення сирої та сухої біомаси до фази технічної зрілості (кущіння). Встановлено, що найбільш ефективним для більшості сортів є спектральне співвідношення 460–620–660 нм (%) 25–25–50, яке забезпечило максимальні показники росту та врожайності. Варіант 25–0–75 виявився найменш ефективним і спричинив істотне зниження біомаси у всіх сортів. Підвищення частки короткохвильового червоного випромінювання стимулювало швидше формування листового апарату на ранніх етапах розвитку (особливо у сорту Либідь). У сортів Грація та Сицилія спостерігалось тимчасове пригнічення проростання, однак до фази кущіння їх асиміляційна поверхня перевищувала контроль на 40–90%. Довгохвильове червоне світло мало найбільш виражений пригнічувальний ефект: рослини не досягали фази кущіння, а накопичення біомаси відбувалося у п'ять разів повільніше за контроль. Змішаний червоний спектр сприяв підвищенню врожайності (особливо у сортів Грація та Агрис), проте супроводжувався зниженням вмісту фотосинтезуючих пігментів і вторинних метаболітів. Отримані результати підтверджують необхідність оптимізації спектрального складу досвічування з урахуванням сортових особливостей руколи та балансу між кількісними і якісними показниками продукції.

Ключові слова: рукола, фотосинтетична продуктивність, світлодіодне досвічування, спектральний склад світла, закритий ґрунт, гідропонне вирощування, врожайність.

RUGALA PRODUCTIVITY UNDER DIFFERENT OPTIONS OF CULTIVATION IN CLOSED GROUND CULTIVATION STRUCTURES

**B. V. Matviychuk, N. G. Matviychuk, L. G. Savchenko,
O. O. Lyubarska, B. R. Kostenko**

*The growing role of controlled environment technologies and the need to optimize the light regime as a key factor in regulating the photosynthetic productivity of leafy vegetable crops determine the current scientific and practical significance of research in this area. Arugula (*Eruca sativa* L.) is characterized by high plasticity to the spectral composition of light, which makes it a promising object for improving LED supplementary lighting regimes in order to increase yield and preserve product quality in closed soil conditions. The research was conducted in 2023–2024 in the greenhouse of the Green Farm private enterprise using hydroponic cultivation technology with full control of microclimate and nutrition parameters. The objects were five varieties of arugula: Gracia, Tricia, Agris, Lybid, Sicilia. The effect of three variants of LED lighting (460–620–660 nm) with a constant proportion of blue light (25%) and different ratios of red parts of the spectrum was studied. Plants grown under natural light served as controls. Biometric indicators, leaf surface area, and accumulation of fresh and dry biomass to the technical maturity phase (tillering) were evaluated. It was found that the most effective for most varieties is the spectral ratio 460–620–660 nm (%) 25–25–50, which provided maximum growth and yield. The 25–0–75 variant was the least effective and caused a significant decrease in biomass in all varieties. An increase in the proportion of short-wave red radiation stimulated faster formation of the leaf apparatus at the early stages of development (especially in the Lybid variety). In the varieties Gratsia and Siciliya, temporary inhibition of germination was observed, however, by the tillering phase, their assimilation surface exceeded the control by 40–90%. Long-wave red light had the most pronounced inhibitory effect: plants did not reach the tillering phase, and biomass accumulation occurred five times slower than in the control. The mixed red spectrum contributed to an increase in yield (especially in the varieties Gracia and Agris), but was accompanied by a decrease in the content of photosynthetic pigments and secondary metabolites. The results obtained confirm the need to optimize the spectral composition of supplementary lighting, taking into account the varietal characteristics of arugula and the balance between quantitative and qualitative indicators of production.*

Key words: arugula, photosynthetic productivity, LED supplementary lighting, spectral composition of light, closed soil, hydroponic cultivation, yield.

Вступ

Розвиток теплиць і тепличних комплексів останніми роками значно інтенсифікується, що зумовлено, зокрема, сучасними кліматичними змінами. До культур, вирощування яких є доцільним в умовах захищеного ґрунту, належать томат, огірок, перець, редька, салатні культури, пряні трави, а також різноманітні види квітково-декоративної продукції. Водночас кожна з перелічених культур характеризується специфічними особливостями росту та вегетаційного розвитку, що обумовлює необхідність застосування диференційованих технологій їх вирощування (Міненко та ін., 2016; Савченко & Савченко, 2020; Nitu et al., 2025). Але загальним для всіх технологій у середовищі закритого ґрунту є основна його перевага – можливість контролю параметрів мікроклімату, що значною мірою впливають на ріст рослин. До таких параметрів можна віднести: температура повітря та середовища, де знаходиться корінь, вологість повітря, насиченість повітря CO₂, освітленість. Всі ці параметри, а також їх комбінації значною мірою впливають на розвиток рослин і як наслідок на їх урожайність (Fu et al., 2012; Waqas et al., 2021; Kalia, 2024).

Ключовим параметром мікроклімату, що визначає інтенсивність росту та розвитку рослин, зокрема салатних культур і прямих трав, є рівень освітленості. Для зазначених культур особливого значення набувають якісні характеристики листової маси, включаючи її вітамінний склад. Освітленість безпосередньо впливає на перебіг фотосинтетичних процесів і, відповідно, на формування врожайності. Водночас технологічний процес ускладнюється необхідністю запобігання накопиченню нітратної форми азоту в листках, що має негативний вплив на здоров'я людини (Cometti et al., 2021; Ferron-Carrillo et al., 2021; Li et al., 2023; Nitu et al., 2025).

Ефективність фотосинтезу є ключовим фактором, що визначає продуктивність листових овочевих культур у системах контрольованого середовища вирощування (СЕА). У закритому ґрунті освітлення забезпечує основне джерело енергії для фотосинтетичних процесів, що безпосередньо впливає на накопичення біомаси, морфологічний розвиток та функціональний стан рослин. Сучасні системи освітлення на основі світлодіодів (LED) дозволяють тонко налаштувати спектральний склад, інтенсивність та фотоперіод, що стають вирішальними пара-

метрами для оптимізації фотосинтетичної продуктивності культур, таких як рукола (*Eruca sativa* Mill.) (Jose et al., 2020; Zhou & Wu, 2025).

У процесі аналізу впливу освітлення на ріст і розвиток рослин доцільно виокремити низку параметрів освітленості, що мають визначальне значення під час розроблення методів і систем освітлення, а також встановлення оптимальної тривалості світлового періоду (Jose et al., 2020; Waqas et al., 2021; Kaplan et al., 2024).

Параметри освітлення також взаємодіють із фотоперіодом і загальною кількістю фотосинтетично активного випромінювання (PPFD), що формує денний світловий інтеграл (DLI). Останні дослідження вказують, що оптимальна інтенсивність світла та тривалість фотоперіоду можуть підвищувати накопичення сухої маси та загальну продуктивність фотосинтезу у руколи, зокрема завдяки підтримці стабільної концентрації хлорофілу та уповільненню процесів фотодеградації (Li et al., 2023).

Аналіз наукових джерел дозволив ідентифікувати ключові фактори мікроклімату, що визначають продуктивність фотосинтетичних процесів у тепличних рослин. У низці досліджень вивчено вплив окремих параметрів мікроклімату на ріст і розвиток рослин, у результаті чого встановлено найбільш значущі чинники та їх кількісні характеристики для конкретних культур. Крім того, в окремих наукових працях розглянуто питання комплексного впливу параметрів мікроклімату на фізіологічні процеси рослин (Fu et al., 2012; Jin et al., 2023; Chowdhury et al., 2024).

Незважаючи на наявні дослідження щодо впливу світла на ріст руколи, питання оптимального спектрального складу, фотоперіоду та діапазону інтенсивності освітлення для максимізації фотосинтетичної продуктивності й врожайності саме в умовах закритого ґрунту залишаються недостатньо вивченими. У зв'язку з цим, систематичне дослідження варіантів досвічування салатних рослин стає актуальним завданням для сучасної біотехнології рослинництва, особливо в умовах інтенсивних агротехнологій СЕА, де вирощування рослин залежить від оптимізації освітлення як основного фактору фотосинтезу.

Матеріал і методи

Експериментальні дослідження проводилися у дослідній теплиці ФОП «Green Farm» протягом 2023–2024 років. Вирощування сільськогосподарських культур здійснюва-

лося із застосуванням гідропонного методу. Як основне технологічне обладнання використовували салатну лінію виробництва Viemose DGS A/S (Данія) та заливні столи. Контроль параметрів температури й відносної вологості повітря забезпечувався за допомогою комбінованого датчика RTF-6 виробництва Senmatic A/S (Данія). Для подачі маточного розчину застосовувався зрошувальний міксер AMI Penta виробництва Senmatic A/S (Данія), що дало змогу здійснювати повний контроль параметрів мікроклімату та оперативно коригувати рецептуру живильного розчину.

Вирощування рослин проводили на верховому торфі, попередньо нейтралізованому та збагаченому комплексом поживних речовин. У дослідженнях використовувався субстрат із такими характеристиками: кислотність (pH) – 5,5–6,5; вміст азоту (N) – 120–160 мг/л; фосфору (P₂O₅) – 160–200 мг/л; калію (K₂O) – 190–240 мг/л.

Для висаджування рослин використовували вегетаційні посудини об'ємом 0,5 л, у кожній з яких розміщували по чотири рослини. Контрольну групу становили рослини, вирощені в умовах оранжереї за природного освітлення.

Вибір об'єкта дослідження зумовлений високою пластичністю цієї культури, яка характеризується швидкою реакцією на зміни спектрального складу освітлення. Рукола представлена значною кількістю сортів, що відрізняються між собою морфологічними ознаками; у межах дослідження було використано п'ять сортів цієї культури.

Як базову поливну воду застосовували воду з такими показниками: кислотність (pH) – 6,9; електропровідність (ЕС) – <0,59. Вміст окремих елементів, що перевищують нормативні значення для поливної води та підлягають урахуванню при формуванні рецептури маточного розчину, становив: калій – 1,54 мкмоль/л; магній – 0,74 мкмоль/л; залізо – 16,5 мкмоль/л.

Експеримент проводився із застосуванням штучного освітлення із попередньо визначеним спектральним складом, сформованим у червоній та синій ділянках спектра. Джерелом світла слугували світлодіодні випромінювачі (СВД). У межах дослідження було реалізовано три варіанти штучного освітлення. В усіх варіантах частка синього спектра залишалася сталою і становила 25 %, тоді як сумарна частка червоного випромінювання відрізнялася залежно від варіанту дослідження.

Схема дослідження

Фактор А (сорт)	Фактор В (освітлення)
Грація	СВД 460–620–660 Нм (%)
Триція	25–75–0
Агріс	СВД 460–620–660 Нм (%)
Либідь	25–0–75
Сицилія	СВД 460–620–660 Нм (%)
	25–25–50

Вирощування рослин здійснювали до досягнення технологічної зрілості, яка наставала у фазі куштиння. Упродовж усього періоду індивідуального розвитку проводили систематичні спостереження за процесами росту та особливостями розвитку досліджуваних об'єктів. З визначеною періодичністю здійснювали вимірювання висоти рослин, а також визначали площу листової поверхні та біомасу. Дослід було проведено у чотирикратній повторності.

Результати та їх обговорення

Фізіологічні процеси рослин залежать не лише від інтенсивності світла, а й від його спектральної якості. Продуктивність рослин безпосередньо пов'язана з перебігом цих процесів. У фотоморфогенезі особливе значення має співвідношення червоного та синього спектрів. Червоний спектр охоплює широку область довжин хвиль, тому випромінювання червоного спектра з різними довжинами хвиль по-різному впливає на фізіологічні процеси рослин, що, у свою чергу, визначає їх ріст і розвиток (Ferguson-Carrillo et al., 2021).

Застосування світлодіодних випромінювачів надало можливість здійснити дослідження впливу вузькоспектрального освітлення на фізіологічні процеси рослин. Було проведено вивчення впливу різних ділянок червоного спектра на морфогенез руколи (*Eruca sativa* L.) та на продуктивні процеси цієї культури.

У таблиці 1 наведено результати дослідження впливу різних спектральних режимів світлодіодного досвічування (СВД 460–620–660 нм) на показники рослин різних сортів руколи. Контрольним варіантом були рослини без додаткового досвічування, а експериментальні варіанти передбачали різне співвідношення спектрів: 25–75–0, 25–0–75 та 25–25–50 (%). Дані подані у вигляді середнього значення ± похибка.

У сорту Триція найвищий показник зафіксовано у варіанті 25–25–50 (32,5 ± 0,7 г/горщ.), що суттєво перевищує контроль (21,1 ± 0,5 г/горщ.). Найнижче значення відмічено у варіанті 25–0–75 (7,3 ± 0,1 г/горщ.).

Таблиця 1

Накопичення наземної маси руколи (*Eruca sativa L.*) за впливу досвічування, г/горщ

Сорт руколи	Контроль	Варіант досвічування		
		СВД 460–620–660 Нм (%) 25–75–0	СВД 460–620–660 Нм (%) 25–0–75	СВД 460–620–660 Нм (%) 25–25–50
Триція	21,1±0,5	23,4±0,5	7,3±0,1	32,5±0,7
Грація	10,6±0,4	9,8±0,1	4,5±0,1	11,7±0,2
Либідь	19,8±0,5	15,4±0,4	7,1±0,2	20,8±0,4
Сицилія	16,9±0,3	15,1±0,3	13,1±0,4	22,6±0,9
Агрис	18,9±0,8	14,1±0,2	4,6±0,1	23,6±0,6

У сорту Грація показники загалом нижчі порівняно з іншими сортами. Максимальне значення спостерігалось у варіанті 25–25–50 (11,7±0,2 г/горщ.), що децю перевищує контроль (10,6±0,4 г/горщ.), тоді як мінімальне – у варіанті 25–0–75 (4,5±0,1 г/горщ.).

У сорту Либідь найвищий показник відзначено у варіанті 25–25–50 (20,8±0,4 г/горщ.), що трохи перевищує контроль (19,8±0,5 г/горщ.). Варіант 25–0–75 також характеризувався зниженням показника (7,1±0,2 г/горщ.).

Сорт Сицилія продемонстрував позитивну реакцію на спектр 25–25–50 (22,6±0,9 г/горщ.) порівняно з контролем (16,9±0,3 г/горщ.). Найменше значення зафіксовано у варіанті 25–0–75 (13,1±0,4 г/горщ.), хоча зниження не було таким різким, як у попередніх сортів.

У сорту Агрис також найвищий показник отримано у варіанті 25–25–50 (23,6±0,6 г/горщ.), що значно перевищує контроль (18,9±0,8 г/горщ.). Найнижче значення відмічено у варіанті 25–0–75 (4,6±0,1 г/горщ.).

Загалом можна зробити висновок, що найбільш ефективним спектральним співвідношенням для більшості досліджуваних сортів руколи є варіант досвічування СВД 460–620–660 Нм (%), 25–25–50, який забезпечив найвищі показники. Натомість варіант досвічування СВД 460–620–660 Нм (%), 25–0–75 виявився найменш ефективним і у всіх сортів спричинив істотне зниження досліджуваного показника порівняно з контролем.

Інший аспект впливу світла на продуктивність фотосинтезу руколи пов'язаний із тривалістю освітлення (фотоперіодом). Дослідження рослин Brassicaceae, до яких належить рукола, свідчать про можливість підвищення урожайності та накопичення біоактивних сполук при застосуванні безперервного (continuous) освітлення у порівнянні

з традиційним денним циклом. Такі умови можуть сприяти як збільшенню хлорофільних пігментів, так і активності антиоксидантних ферментів у молодих рослинних органах, що є показником адаптації до світлового стресу та підвищеної фотосинтетичної активності (Min et al., 2021; Voutsinos et al., 2021).

Проведені експерименти дозволили встановити, що на характер фізіологічних процесів руколи істотно впливає якість червоного світла. При збільшенні кількості короткохвильового випромінювання червоної частини спектра на початкових етапах розвитку листовий апарат у зеленитовій масі формувалася швидше. Особливо помітно це виявлялося у сорту Либідь (рис. 1 а). На наступних етапах відмінності ставали менш суттєвими. Але до куціння рослини даного сорту, які вирощувалися при світлі з короткохвильовою червоною складовою, накопичували біомасу не гірше, ніж контрольні варіанти, вирощувані при природному освітленні.

Деякі сорти руколи, зокрема «Грація» та «Сицилія», на ранніх етапах розвитку демонстрували уповільнений ріст (рис. 1б). Встановлено, що короткохвильове червоне світло пригнічувало проростання рослин. Проте до фази куціння рослини, вирощені при короткохвильовому та змішаному червоному освітленні, формували асиміляційну поверхню, яка перевищувала аналогічні показники контрольної групи на 40–90 %. Водночас усі сорти, вирощені за таких умов, втратили характерне забарвлення листків, набувши зелений відтінок, притаманний «тіньовим» листям.

Довгохвильове червоне світло діяло гнітюче на всі сорти руколи. Жодне з досліджених рослин не дійшло до фази куціння, а листова поверхня була істотно менше.

Фаза технічної зрілості (куціння) визначалася за розвитком контрольних рослин. Більшість об'єктів, підданих дії короткохвильового та змішаного червоного спектра,

досягли куштиння одночасно з контрольними рослинами. Відставання було зафіксоване лише у сорту руколи «Грація», вирощеного в умовах змішаного червоного освітлення, де до фази куштиння дійшли лише 30 % рослин цієї дослідної групи.

Дослідження інших науковців з вирощування руколи під різними спектральними умовами LED-освітлення показали, що співвідношення червоного та синього світла суттєво впливає на фізіологічні характеристики рослин. Зокрема, в експерименті з контролем спектральної якості світла визначено, що рослини руколи, вирощені під LED-освітленням з певним співвідношенням червоного і синього спектра, мали вищі показники біомаси, вмісту хлорофілу й сухої маси порівняно з іншими варіан-

тами спектру, що прямо пов'язано з фотосинтетичною активністю листків (Zhou & Wu, 2025).

Аналіз біометричних показників врожайності (рис. 2) продемонстрував перевагу змішаного червоного спектра порівняно з короткохвильовим. Окреме застосування короткохвильового або довгохвильового червоного світла призводило до пригнічення росту рослин та зниження накопичення біомаси. При цьому довгохвильове випромінювання мало більш виражений гнітючий ефект, оскільки біомаса рослин накопичувалася приблизно в п'ять разів повільніше порівняно з контрольним варіантом.

Сорти «Грація» та «Агрис» продемонстрували збільшення біомаси під дією світла змішаного спектра порівняно з контрольним



а)

б)

Рис. 1. Загальний вигляд куща руколи сортів «Либідь» (а) та «Грація» (б), (15 день)

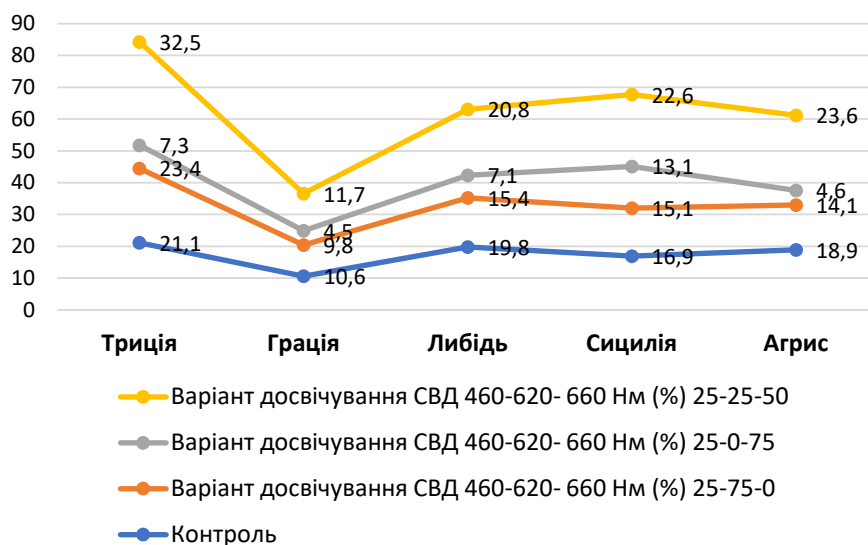


Рис. 2. Зміна приросту зеленої маси залежно від способів досвічування, г/горщ.

варіантом. Водночас спостерігалось погіршення якісних показників продукції, що проявлялося у зниженні вмісту фотосинтезуючих пігментів та вторинних метаболітів.

Науковці Нанкінського сільськогосподарського університету (Китай) провівши дослідження впливу інтенсивності світла на ріст і розвиток салатних культур, підтверджують, що вища інтенсивність світла сприяла підвищенню їх харчової цінності, що характеризується нижчим рівнем нітратів та вмістом розчинного білка. Аналіз головних компонентів показав негативну колінеарність між вмістом нітратів та вмістом розчинного білка та V_c . Результати показали, що обробка T2G2 показала вищу висоту рослин, біомасу та чисту швидкість фотосинтезу, тоді як T1G2 призвів до зменшення площі листя та нижчої максимальної фотохімічної ефективності фотосистеми II (Fv/Fm) порівняно з T1G1 (Chen et al., 2021).

Проведене дослідження впливу умов росту та розвитку рослин дозволяє зробити висновок, що ключовим процесом, який визначає формування врожаю, є фотосинтез. Інтенсивність і ефективність фотосинтетичних процесів, у свою чергу, значною мірою залежать від ряду параметрів мікроклімату, серед яких першочергове значення має освітлення.

Висновки

На основі проведених досліджень встановлено, що спектральний склад досвічування є визначальним фактором регуляції фотосинтетичної продуктивності та формування біомаси руколи в умовах культивацийних споруд закритого ґрунту. Найбільш ефективним для більшості досліджуваних сортів виявився варіант досвічування СВД 460–620–660 нм (%) у співвідношенні 25–25–50, який забезпечив максимальні показники росту, асиміляційної поверхні та врожайності.

Натомість варіант СВД 460–620–660 нм (%) 25–0–75 продемонстрував найменшу ефективність, спричинивши істотне зниження досліджуваних показників у всіх сортів порівняно з контролем. Отримані результати свідчать про негативний вплив надмірної частки довгохвильового червоного світла на ріст і розвиток рослин, що проявлялося у пригніченні формування

листової поверхні та значному зменшенні біомаси.

Встановлено, що якість червоного світла істотно впливає на перебіг фізіологічних процесів руколи. Збільшення частки короткохвильового випромінювання червоної частини спектра на ранніх етапах онтогенезу сприяло прискореному формуванню листового апарату, особливо у сорту Либідь. На подальших етапах розвитку різниця між варіантами освітлення зменшувалася, проте рослини, вирощені за умов короткохвильового та змішаного червоного освітлення, накопичували біомасу на рівні або вище контрольних варіантів.

У сортів Грація та Сицилія на початкових фазах розвитку спостерігалось певне пригнічення проростання під впливом короткохвильового червоного світла, однак до фази куціння їх асиміляційна поверхня перевищувала контроль на 40–90%. Разом із тим у всіх сортів за умов досвічування червоним спектром відмічено зміну морфологічних ознак – зниження інтенсивності характерного забарвлення та формування ознак «тіньових» листків.

Довгохвильове червоне світло виявило найбільш пригнічувану дію: жодна рослина не досягла фази куціння, а накопичення біомаси відбувалося у п'ять разів повільніше, ніж у контрольному варіанті. Біометричний аналіз підтвердив перевагу змішаного спектра червоного світла над його монохроматичними складовими.

Сорти Грація та Агрис продемонстрували підвищення біомаси під впливом змішаного спектра порівняно з контролем, однак це супроводжувалося зниженням якісних показників продукції – зменшенням вмісту фотосинтезуючих пігментів та вторинних метаболітів.

Отже, оптимізація спектрального складу досвічування повинна враховувати не лише приріст біомаси, а й збереження якісних характеристик продукції. Найбільш збалансованим з точки зору фотосинтетичної продуктивності та формування врожаю виявився варіант СВД 460–620–660 нм (%) 25–25–50, який може бути рекомендований для вирощування більшості досліджених сортів руколи в умовах закритого ґрунту.

Список використаної літератури

Міненко С. В., Савченко В. М., Крот В. В. Аналіз залежності інтенсивності продуктивного фотосинтезу від режимів мікроклімату в індустріальних теплицях. *Вісник ЖНАЕУ*. 2016. 1 (53), т. 1. С. 270–276.

Савченко О.В., Савченко Л.Г. Дослідження залежності продуктивного фотосинтезу рослин від значень параметрів мікроклімату в культиваційних спорудах закритого ґрунту. Матер. І всеукр. студ. наук.–практ. конф. «Теорія і практика сучасної науки очима молоді», 26 березня 2020 р. Харків: ХНТУСГ, 2020. С. 155–156.

Aznar–Sanchez J.A., Velasco–Munoz J.F., Lopez–Felices B., Roman–Sanchez I.M. An Analysis of Global Research Trends on Greenhouse Technology: Towards a Sustainable Agriculture. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2020. 17(2). 664. <https://doi.org/10.3390/ijerph17020664>

Chen Z., Shah Jahan M., Mao P., Wang M., Liu X., Guo S. Functional growth, photosynthesis and nutritional property analyses of lettuce grown under different temperature and light intensity. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 2021. 96. P. 53–61. <https://doi.org/10.1080/14620316.2020.1807416>

Chowdhury M., Samarakoon U.C., Altland J.E. Evaluation of hydroponic systems for organic lettuce production in controlled environment. *Front. Plant Sci.* 2024. 15:1401089. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1401089>

Cometti N.N., Martins M.Q., Bremenkamp C.A., Nunes J.A. Nitrate concentration in lettuce leaves depending on photosynthetic photon flux and nitrate concentration in the nutrient solution. *Hortic. Bras.* 2011. 29. 548–553. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362011000400018>

Ferron–Carrillo F., Guil–Guerrero J.L., Gonzalez–Fernandez M.J., Lyashenko S., Battafarano F., da Cunha–Chiamolera T.P.L., Urrestarazu M. LED Enhances Plant Performance and Both Carotenoids and Nitrates Profiles in Lettuce. *Plant Foods Hum. Nutr.* 2021. 76(2). 210–218. <https://doi.org/10.1007/s11130-021-00894-8>

Fu W., Li P., Wu Y., Tang J. Effects of different light intensities on anti–oxidative enzyme activity, quality and biomass in lettuce. *Hortic. Sci.* 2012. 39. 129–134. <https://doi.org/10.17221/192/2011-HORTSCI>

Jin W., Formiga Lopez D., Heuvelink E., Marcelis L.F. Light use efficiency of lettuce cultivation in vertical farms compared with greenhouse and field. *Food Energy Secur.* 2023. 12. <https://doi.org/10.1002/fes3.391>

Kalia P. Designing Futuristic Vegetable Varieties for Multiple Purposes. In: Genetic Engineering of Vegetable Crops. *CABI: Wallingford, UK*, 2024. 414–430.

Kaplan A., Khan M.N., Hayat K., Iqbal M., Ali B., Wahab S., Wahid N., Kanwal. Coupling environmental factors and climate change: Impacts on plants and vegetation growth patterns in ecologically sensitive regions. In: Environment, Climate, Plant and Vegetation Growth. *Springer Nature: Cham, Switzerland*, 2024. 307–358. https://doi.org/10.1007/978-3-031-69417-2_11

Li T., Liu H., Zhou F. Effects of Light Intensity and Photoperiod on the Fresh Locking and Quality of Hydroponic Arugula in the Harvesting Period. *Agronomy*. 2023. 13. 1667. <https://doi.org/10.3390/agronomy13071666>

Min Q., Marcelis L.F.M., Nicole C.C.S., Woltering E.J. High Light Intensity Applied Shortly Before Harvest Improves Lettuce Nutritional Quality and Extends the Shelf Life. *Front. Plant Sci.* 2021. 12:615355. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.615355>

Nitu O.A., Ivan E.S., Arshad A. Optimizing Microclimatic Conditions for Lettuce, Tomatoes, Carrots, and Beets: Impacts on Growth, Physiology, and Biochemistry Across Greenhouse Types and Climatic Zones. *Int. J. Plant Biol.* 2025. 16(3). 100. <https://doi.org/10.3390/ijpb16030100>

Voutsinos O., Mastoraki M., Ntatsi G., Liakopoulos G., Savvas D. Comparative Assessment of Hydroponic Lettuce Production Either under Artificial Lighting, or in a Mediterranean Greenhouse during Wintertime. *Agriculture*. 2021. 11(6). 503. <https://doi.org/10.3390/agriculture11060503>

Waqas A., Umair M., Ahmad R.N., Khan K.S. Assessment of crop responses and climatic parameters by developing indigenous hydroponic greenhouses in different regions of Punjab–Pakistan. *Pak. J. Agric. Sci.* 2021. 58. 643–654. <https://doi.org/10.21162/PAKJAS/21.1065>

Zhou F., Wu H. Effects of LED Light Quality on the Growth Characteristics and Nutritional Quality of Hydroponic Arugula. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 2025. 18 (4). 71–77. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20251804.6709>

References

Minenko, S.V., Savchenko, V.M., & Krot, V.V. (2016). Analiz zalezhnosti intensyvnosti produktyvnoho fotosyntezy vid rezhymiv mikroklimatu v industrialnykh teplytsiakh [Analysis of the dependence of the intensity of productive photosynthesis on microclimate regimes in industrial greenhouses]. *Visnyk ZhNAEU [Bulletin of ZhNAEU]*, 1(53), Vol. 1, 270–276 [in Ukrainian].

Savchenko, O.V., & Savchenko, L.H. (2020). Doslidzhennia zalezhnosti produktyvnoho fotosyntezy roslyn vid znachen parametriv mikroklimatu v kultyvatsiinykh sporudakh zakrytoho gruntu [Study of the dependence of productive photosynthesis of plants on microclimate parameters in protected cultivation structures]. *Materialy I vseukrainskoi studentskoi naukovo–praktychnoi konferentsii “Teoriia i praktyka suchasnoi nauky ochyma molodi”* [Proceedings of the 1st All-Ukrainian Student Scientific and Practical Conference “Theory and Practice of Modern Science through the Eyes of Youth”]. Kharkiv: KhNTUSG, 155–156 [in Ukrainian].

Aznar-Sanchez, J.A., Velasco-Munoz, J.F., Lopez-Felices, B., & Roman-Sanchez, I.M. (2020). An analysis of global research trends on greenhouse technology: Towards a sustainable agriculture. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(2), 664. <https://doi.org/10.3390/ijerph17020664> [in English].

Chen, Z., Shah Jahan, M., Mao, P., Wang, M., Liu, X., & Guo, S. (2021). Functional growth, photosynthesis and nutritional property analyses of lettuce grown under different temperature and light intensity. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 96, 53–61. <https://doi.org/10.1080/14620316.2020.1807416> [in English].

Chowdhury, M., Samarakoon, U.C., & Altland, J.E. (2024). Evaluation of hydroponic systems for organic lettuce production in controlled environment. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1401089. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1401089> [in English].

Cometti, N.N., Martins, M.Q., Bremerkamp, C.A., & Nunes, J.A. (2011). Nitrate concentration in lettuce leaves depending on photosynthetic photon flux and nitrate concentration in the nutrient solution. *Horticultura Brasileira*, 29, 548–553. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362011000400018> [in English].

Ferron-Carrillo, F., Guil-Guerrero, J.L., Gonzalez-Fernandez, M.J., Lyashenko, S., Battaferano, F., da Cunha-Chiamolera, T.P.L., & Urrestarazu, M. (2021). LED enhances plant performance and both carotenoids and nitrates profiles in lettuce. *Plant Foods for Human Nutrition*, 76(2), 210–218. <https://doi.org/10.1007/s11130-021-00894-8> [in English].

Fu, W., Li, P., Wu, Y., & Tang, J. (2012). Effects of different light intensities on antioxidative enzyme activity, quality and biomass in lettuce. *Horticultural Science*, 39, 129–134. <https://doi.org/10.17221/192/2011-HORTSCI> [in English].

Jin, W., Formiga Lopez, D., Heuvelink, E., & Marcelis, L.F. (2023). Light use efficiency of lettuce cultivation in vertical farms compared with greenhouse and field. *Food and Energy Security*, 12. <https://doi.org/10.1002/fes3.391> [in English].

Kalia, P. (2024). Designing futuristic vegetable varieties for multiple purposes. In: Genetic Engineering of Vegetable Crops. *Wallingford, UK: CABI*, 414–430 [in English].

Kaplan, A., Khan, M.N., Hayat, K., Iqbal, M., Ali, B., Wahab, S., Wahid, N., & Kanwal (2024). Coupling environmental factors and climate change: Impacts on plants and vegetation growth patterns in ecologically sensitive regions. In: Environment, Climate, Plant and Vegetation Growth. *Cham, Switzerland: Springer Nature*, 307–358. https://doi.org/10.1007/978-3-031-69417-2_11 [in English].

Li, T., Liu, H., & Zhou, F. (2023). Effects of light intensity and photoperiod on the fresh locking and quality of hydroponic arugula in the harvesting period. *Agronomy*, 13, 1667. <https://doi.org/10.3390/agronomy13071666> [in English].

Min, Q., Marcelis, L.F.M., Nicole, C.C.S., & Woltering, E.J. (2021). High light intensity applied shortly before harvest improves lettuce nutritional quality and extends the shelf life. *Frontiers in Plant Science*, 12, 615355. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.615355> [in English].

Nitu, O.A., Ivan, E.S., & Arshad, A. (2025). Optimizing microclimatic conditions for lettuce, tomatoes, carrots, and beets: Impacts on growth, physiology, and biochemistry across greenhouse types and climatic zones. *International Journal of Plant Biology*, 16(3), 100. <https://doi.org/10.3390/ijpb16030100> [in English].

Voutsinos, O., Mastoraki, M., Ntatsi, G., Liakopoulos, G., & Savvas, D. (2021). Comparative assessment of hydroponic lettuce production either under artificial lighting or in a Mediterranean greenhouse during wintertime. *Agriculture*, 11(6), 503. <https://doi.org/10.3390/agriculture11060503> [in English].

Waqas, A., Umair, M., Ahmad, R.N., & Khan, K.S. (2021). Assessment of crop responses and climatic parameters by developing indigenous hydroponic greenhouses in different regions of Punjab-Pakistan. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 58, 643–654. <https://doi.org/10.21162/PAKJAS/21.1065> [in English].

Zhou, F., & Wu, H. (2025). Effects of LED light quality on the growth characteristics and nutritional quality of hydroponic arugula. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 18 (4), 71–77. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20251804.6709> [in English].

Дата першого надходження статті до видання: 23.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)