



УДК 635.5:631.589.2

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.11.2025.17>

ВПЛИВ СВІТЛОДІОДНОГО ОСВІТЛЕННЯ НА ГОСПОДАРСЬКО-БІОЛОГІЧНІ ПОКАЗНИКИ САЛАТУ ПОСІВНОГО ТА ВАСИЛЬКІВ СПРАВЖНІХ

О. І. Куценко¹, І. Л. Гавриць²

Світові тенденції вирощування овочевих культур невпинно крокують до все ширшого впровадження сучасних і енергоефективних технологій в овочівництві. Протягом останніх 5 років сучасні системи освітлення стають усе більш доступні українським виробникам овочів, а також ентузіастам, які пробують себе в цілорічному вирощуванні овочевих культур. Також в Україні починають з'являтися власні розробники та виробники світлодіодного освітлення для рослин, яке не поступається за характеристиками зарубіжним зразкам, а за ціною може бути набагато дешевше. Основною метою статті є проведення аналізу закордонного досвіду використання світлодіодного освітлення, його впливу на ріст і розвиток зеленних овочевих культур. Стаття покликана пролити світло на використання світлодіодного освітлення під час вирощування зеленних овочів у культивацийних спорудах закритого ґрунту, особливо щодо перспектив використання світлодіодного освітлення на вертикальних фермах і фабриках рослин.

У статті представлено результати вивчення наукових праць і статей зарубіжних науковців, які пов'язані із впливом світлодіодного освітлення на ріст і розвиток зеленних овочевих культур. Основна увага у статті приділена впливу світлодіодного освітлення на господарсько-біологічні показники зеленних культур за вирощування в контрольованих умовах закритого ґрунту. Також описано умови та комбінації освітлення, за яких можна досягти необхідних для виробництва показників готової продукції, яка в кінцевому підсумку може бути використана за різним цільовим призначенням. Так, наприклад, комбінація різного відсоткового співвідношення спектрів може допомогти наростити більшу біомасу рослини та навпаки, зменшити вагу біомаси і підвищити її генеративні спроможності. Усе це може свідчити про важливість і актуальність таких досліджень в Україні та світі.

Ключові слова: спектр, вплив, інтенсивність, освітлення, салат, базилік.

¹ здобувач наукового ступеня доктора філософії
кафедри овочівництва і закритого ґрунту
(Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ)
e-mail: kutsenkooleksand@ukr.net
ORCID: 0009-0004-9708-8674

² кандидат сільськогосподарських наук,
доцент кафедри овочівництва і закритого ґрунту
(Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ)
e-mail: havris@ukr.net
ORCID:0000-0001-5965-9916

THE IMPACT OF LED LIGHTING ON THE AGRO-BIOLOGICAL CHARACTERISTICS OF LETTUCE AND BASIL

O. I. Kutsenko, I. L. Havrys

Global trends in vegetable growing are steadily moving towards the wider adoption of modern and energy-efficient technologies in vegetable production. Over the past 5 years, modern lighting systems have become increasingly available to Ukrainian vegetable growers and enthusiasts who are trying their hand at growing vegetables year-round. Also, Ukraine is starting to develop its own designers and manufacturers of LED lighting for plants that are not inferior in performance to foreign models, and can be much cheaper. The main purpose of this article is to analyse the foreign experience of using LED lighting and its impact on the growth and development of green vegetable crops. This article aims to shed light on the use of LED lighting in greenhouse cultivation of green vegetables, and especially on the prospects for using LED lighting in vertical farms and plant factories.

The article presents the results of the study of scientific papers and articles by foreign scientists related to the impact of LED lighting on the growth and development of green vegetable crops. The article focuses on the impact of LED lighting on the economic and biological indicators of green crops when grown in controlled indoor conditions. The article also describes under what conditions and with what combinations of lighting it is possible to achieve the indicators of finished products required for production, which can ultimately be used for various purposes. For example, a combination of different percentage ratios of spectra can help to increase the biomass of a plant and vice versa, reduce the weight of biomass and increase its generative capacity. All of this may indicate the importance and relevance of such research in Ukraine and the world.

Key words: spectrum, effect, intensity, lighting, lettuce, basil.

Вступ

У сучасному світі, який невпинно розвивається, важливим чинником щодо збільшення врожайності овочевих культур у спорудах із контрольованим середовищем є використання сучасних освітлювальних технологій, які цілковито забезпечують рослини необхідною кількістю та якістю світла. Традиційне вирощування зеленних овочевих культур уже не задовольняє світовий попит на них, що зростає, а досвід коронавірусних обмежень показав, що вектор уваги зміщується на локальне вирощування у великих містах і мегаполісах. Локалізація виробництва продукції в містах спричиняє збільшення навантаження на енергомережу, як наслідок – потребує використання енергоощадних технологій без погіршення врожайності та якості продукції. Також одним з обмежувальних чинників локалізованого вирощування в містах є брак площі культивативної споруди, що спонукає виробників будувати виробництва не в ширину, а у висоту. За традиційного вирощування зеленних овочевих культур відповідати цим критеріям в умовах міста дуже важко або взагалі неможливо. Отже, ця проблема є актуальною у світових масштабах і в умовах енергетичної кризи в Україні. Зміна кліматичних умов призвела до більш стійких посух, повеней і штормів, а також до посилення активності шкідників і хвороб, які

створюють серйозну загрозу для сільського господарства. Потенційним вирішенням цієї проблеми є намагання використовувати сільське господарство в закритих і міських умовах, посилене належними умовами освітлення, як-от світлодіоди, таким чином усувати неврожай, пов'язані з погодою (Nair & Dhoble, 2015).

Аналіз останніх досліджень в Україні показує, що основними напрямками досліджень із вирощування зеленних культур у закритому ґрунті є вивчення нових перспективних сортів, а також оптимізація класичних технологій вирощування зеленних культур. Використання світлодіодного освітлення в наукових дослідженнях зростає, проте в загальній масі частка таких досліджень усе ще низька. На жаль, велика вартість обладнання для таких досліджень не дозволяє науковцям повною мірою досліджувати це питання на високому рівні. Низька кількість досліджень впливу освітлення на рослини в овочівництві негативно впливає на розвиток цілорічного вирощування зеленних овочів у промислових масштабах. Безперечно, велику роль у згортанні розвитку відіграла війна Росії проти України. Проте нестача наукової бази та фахівців відіграє не менш важливу роль у розвитку цього напрямку вирощування та досліджень.

Основна маса досліджень в Україні спрямована на вдосконалення технологій вирощування

щування зеленних культур під час весняно-осіннього періоду, але повною мірою не розкриває вирощування зеленних культур у світлокультурі та вплив світлодіодного освітлення на ріст і розвиток рослин. Одними з найсвіжіших досліджень у цій тематиці є дослідження продуктивності різних сортів салату на гідропоніці (Паламарчук і Михальчук, 2024). Також проведені дослідження з вирощування салатів різних типів на проточній гідропоніці у плівковій теплиці з використанням органічних і мінеральних субстратів (Ковальов і Звездун, 2021). Ці дослідження є аналізом існуючих класичних прийомів вирощування зеленних овочів у теплицях.

Отже, можна зробити висновок, що вплив і використання світлодіодного освітлення під час вирощування овочевих культур вивчено не досить, що потребує подальших досліджень і вивчення досвіду закордонних наукових установ і організацій.

Мета дослідження – проаналізувати використання різних типів освітлення у вирощуванні салату посівного та васильків справжніх у культивацийних спорудах різних типів. Вплив освітлення на ріст і розвиток зеленних овочевих культур у контрольованих умовах вирощування.

Матеріал і методи

Дослідження проводилися за допомогою проведення аналізу наявних публікацій вітчизняних і закордонних науковців, а також аналізу досліджень приватних компаній, які спеціалізуються на вирощуванні овочів під штучним освітленням. Опрацьовувалися табличні та графічні дані, а також аналізувалися висновки досліджень. Основним у пошуку й аналізі було виявлення результатів, які можна було б застосувати у практичній площині на виробництві.

Результати й обговорення

Світло є дуже важливим джерелом енергії для рослин, забезпечує їх синтезом усіх необхідних речовин під час фотосинтезу. Видиме світло складається з безлічі різних спектрів із різною довжиною хвилі, проте основні спектри, які беруть участь у процесах фотосинтезу, лежать у межах 400–700 нм. Останнім часом у світі починає з'являтися все більше і більше публікацій, спрямованих на глибше дослідження спектрів за межами 400 і 700 нм. Проте основна увага зараз сфокусована саме на дослідженнях у межах 400–700 нм, оскільки оцінити вплив того чи того освітлення в цих межах простіше, без використання занадто доро-

гого обладнання для вимірів. Дані довжини хвиль широко представлені як у повноспектральних світлодіодних фітолампах, так і в біколорних лампах. У повноспектральних лампах, окрім основних довжин хвиль у 450 нм синього спектра та 660 нм червоного, також представлені інші спектри, як-от зелений, з довжиною хвилі 520 нм. Останніми роками на передній план почали виходити дослідження із впливу зеленого спектра на ріст і розвиток рослин, оскільки він має найбільшу проникну здатність серед інших спектрів, здатен збуджувати хлорофіл на досить великій глибині в середині листка. Зокрема, світловим спектром світла тепер можна керувати за допомогою світлодіодних освітлювальних матриць, з використанням спеціального програмного забезпечення (Alrajhi et al., 2023).

Червоний і синій спектри, з довжиною хвилі 660 нм для червоного та 450 нм для синього, в освітленні є найважливішими спектрами для рослин, оскільки їхня відносна квантова енергія та вплив на активні процеси фотосинтезу, отже, і кращий вплив на ростові процеси в рослинах, набагато вищі, ніж в інших спектрів, які видимі для ока людини (McCree, 1971; Stutte, 2009). Багато світових досліджень присвячують впливу співвідношення червоного і синього спектрів на ріст різних овочевих культур (томат, огірок, зеленні овочі), зокрема й салату посівного, який є основним видом рослин, що вирощуються в умовах контрольованого клімату з використанням енергоєфективного світлодіодного освітлення. Хоча для росту салату не було створено уніфікованого й оптимального співвідношення червоного і синього спектрів освітлення, через різні сорти та чинники навколишнього середовища, більшість досліджень, які проводилися, показали, що світловий потік, у якому переважає червоний спектр світла з довжиною хвилі 660 нм (його частка може становити залежно від умов вирощування 75~90%), є максимально сприятливим для активного наростання біомаси салату посівного за стандартного та нормального фотоперіоду для даної культури (Cope et al., 2014; Wang et al., 2016). За результатами проведеного аналізу опублікованих праць і дисертаційних робіт було встановлено, що спектральна складова частина освітлення відіграє важливу роль у формуванні врожаю зеленних культур, особливо культур, у яких у їжу вживається зелена маса рослини. Завдяки спектру виробники можуть

регулювати якість і кількість урожаю, який вони вирощують.

Так, у разі додаткового освітлення різних видів салату листкового комбінаціями різних спектрів із різним співвідношенням, а саме – синього, червоного, синього та червоного, синьо-червоно-зеленого, було виявлено покращення деяких, досить важливих, показників у виробництві. Це дало змогу збільшити площу листової поверхні першого ряду листків на 36, 30, 33% порівняно з контрольним варіантом (Chen et al., 2023). Збільшення площі листової пластини може свідчити про потенційно більшу зелену масу зібраного врожаю з одиниці площі. Це збільшує економічну ефективність виробництва. Також використанням додаткового нижнього (освітлення розміщується знизу під листками першого ряду) та верхнього освітлення можна забезпечити зменшення старіння рослин, а також збільшити економічну ефективність вирощування салату на вертикальних фермах. Збільшення витрат на додаткове освітлення дозволило збільшити об'єм товарного салату на 12,7 і 27,1%. Також використанням додаткового нижнього освітлення вдалося збільшити вихід товарного салату на 35,4%, завдяки зменшенню відходів (Joshi et al., 2017). Також на кінцеву врожайність досить сильно впливає інтенсивність світ-

лового потоку. Так, кількість листків салату на одній рослині може бути більша в разі вирощування під спеціальним світлодіодним освітленням, ніж кількість листків на рослинах, які вирощені під денним світлом, за однаковий проміжок часу (Miao et al., 2023). У разі збільшення інтенсивності освітлення рослин салату збільшується кількість листків на рослині, що свідчить про позитивну реакцію рослин на більшу інтенсивність освітлення та краще поглинання поживних речовин. Проте іноді рослини салату можуть переходити у стадію цвітіння раніше, ніж це потрібно на виробництві (Miao et al., 2023). Такі зміни можуть бути пов'язані з надмірним перегрівом рослин через сильну інтенсивність у період їх активного росту. Такі чинники можуть впливати на пришвидшення деяких фаз розвитку рослин. Наприклад, у разі короткочасної експозиції базилику під ультрафіолетовим світлом UV-A збільшився вміст фенолів у зелених сортах на 170%, а в темних (фіолетових) сортів – на 16%. Також на рис. 1, 2, які наведені нижче, можна добре помітити різницю в рослинах віком 20 днів залежно від обробки рослин різними спектрами освітлення з різним часом експозиції (рис. 1, 2). На зображеннях представлені сорти салату посівного та васильків справжніх (Pacak et al., 2024).

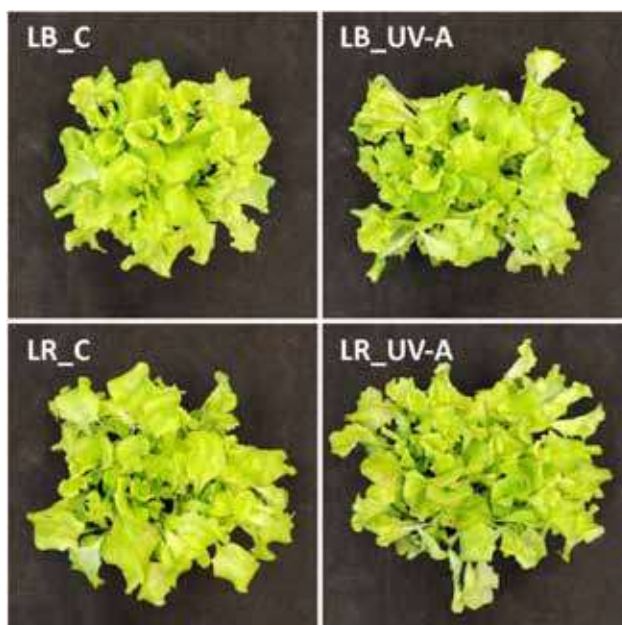


Рис. 1. Морфологія 20-денних рослин салату листкового (*Lactuca sativa* var. *crispa* L.) із зеленим листям (cv. Lollo Bionda, LB) та червоним листям (cv. Lollo Rossa, LR), які були вирощені під дією ламп зі спектром RGB (C, контроль) або RGB + UV-A (з додаванням UV-A)

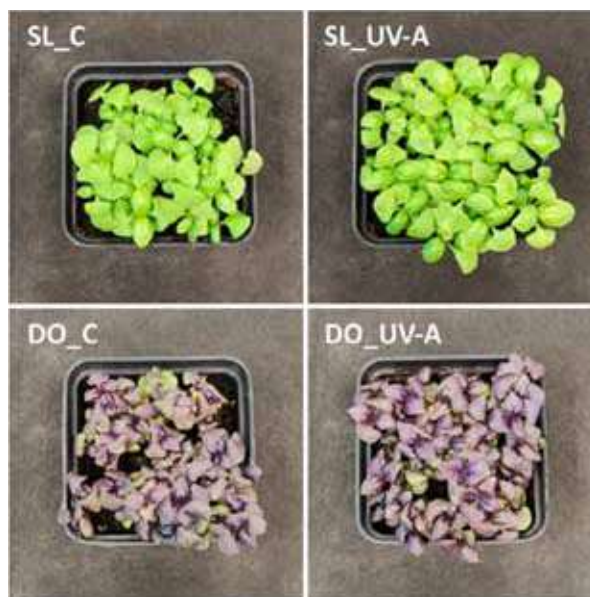


Рис. 2. Морфологія 20-DAS рослин базилику (*Ocimum basilicum* L.) із зеленим (cv. Sweet Large, SL) та фіолетовим листям (cv. Dark Opal, DO), які були вирощені під дією ламп зі спектром RGB (C, контроль) або RGB + UV-A (з додаванням UV-A)

Отже, можна дійти висновку, що для вирощування салату посівного важливим є не тільки спектральний склад освітлення, його енергоефективність, а ще й інтенсивність освітлення. Оскільки, виходячи з наведених вище даних, за визначених умов і використання правильної схеми освітлення можна досягти економії енергетичних ресурсів без втрати показників урожайності та якості кінцевої продукції.

Також однією з популярних зелених культур, які вирощуються на вертикальних фермах, є базилік. Базилік став популярним через свої високі кулінарні й ароматичні якості. Вирощування базилику на вертикальних фермах є досить рентабельним, особливо в зимовий період. Так само, як рослини салату посівного, рослини базилику дуже добре реагують на зміну інтенсивності освітлення. У разі збільшення інтенсивності освітлення базилік показував лінійну або квадратичну зміну показників (рис. 3) залежно від умов і вибраних сортів (Larsen et al., 2020).

Регуляція співвідношення різних спектрів в освітленні під час вирощування базилику дозволяє отримувати врожай різної якості, залежно від попиту споживачів і виробництва. Використання світлодіодних ламп із бікolorним виконанням (поєднання у визначеній пропорції червоних і синіх світлодіодів), 8 або 32% синього світла дозволило отримати продукцію, яка

краще підходить для продажу в пучках. А використання в загальному спектрі 16% синього світла дозволило отримати продукцію, яку вигідніше продавати на вагу. Рослини, вирощені з використанням 16% синього спектра, мали більшу середню вагу. Також використання 32% синього світла підвищує смакові якості базилику (Yelton et al., 2017). Покращення смакових властивостей базилику особливо важливо для ресторанів і кафе. Адже свіжий базилік часто використовується для приготування свіжих соусів і різноманітних салатів. Також поліпшення смакових властивостей дозволить покращити смакові властивості готових спецій, як-от базилік сушений. Дані порівняння морфологічних показників залежно від комбінації різних спектрів наведено на рисунку (рис. 4).

Також було встановлено негативний вплив на рослини базилику збільшення інтенсивності за зменшення довжини світлового дня. Проте також було з'ясовано, що в разі зменшення інтенсивності та збільшення довжини світлового дня рослини базилику позитивно реагували на такі зміни – збільшенням об'єму зеленої маси. Таке явище називають фотоінгібуванням, коли рослина не здатна засвоїти більш інтенсивні світлові потоки (Eghbal et al., 2024).

Висновки

Натепер в Україні майже відсутні дослідження, пов'язані з використанням і впливом

Experiment	Cultivar	Treatment	LUE (g mol ⁻¹)		
			Plant fresh mass	Plant dry mass	
Experiment 1 PPFD	Emily	PPFD (μmol m ⁻² s ⁻¹)			
		50	10.92 ± 0.39c	0.84 ± 0.03a	
		150	10.63 ± 0.39bc	0.91 ± 0.03a	
	Dolly	300	9.33 ± 0.39ab	0.92 ± 0.03a	
		600	8.31 ± 0.39a	1.04 ± 0.03b	
		50	8.92 ± 0.26b	0.55 ± 0.03a	
		150	10.82 ± 0.26c	0.74 ± 0.03b	
300	9.62 ± 0.26b	0.79 ± 0.03bc			
600	7.60 ± 0.26a	0.83 ± 0.03c			
Experiment 2 Blue light fraction	Dolly	days	Blue light (%)		
		5	9	9.01 ± 0.65	0.71 ± 0.06
			33	6.40 ± 0.65	0.65 ± 0.06
			65	7.52 ± 0.65	0.61 ± 0.06
		25	100	7.73 ± 0.65	0.56 ± 0.06
			9	9.01 ± 0.65	0.71 ± 0.06
			33	9.27 ± 0.65	0.69 ± 0.06
65	9.40 ± 0.65		0.70 ± 0.06		
100	8.12 ± 0.65	0.62 ± 0.06			
Experiment 3 Blue light interaction PPFD	Floae	PPFD (μmol m ⁻² s ⁻¹)	Blue light (%)		
		100	9	5.12 ± 0.40	0.35 ± 0.04
		100	90	6.01 ± 0.40	0.42 ± 0.04
	Dolly	300	9	5.09 ± 0.40	0.37 ± 0.04
		300	90	5.75 ± 0.40	0.41 ± 0.04
		100	9	10.8 ± 0.27	0.66 ± 0.02a
		100	90	11.31 ± 0.27	0.68 ± 0.02a
300	9	11.03 ± 0.27	0.78 ± 0.02b		
300	90	11.00 ± 0.27	0.73 ± 0.02b		

LUE is based on PPFD incident on the plants accumulated over the initial (i.e., from transplant until start of treatments) and treatment phase. Letters indicate significant differences.

Рис. 3. Показники врожайності різних сортів базилику залежно від спектрального складника

Light treatment	Averages			
	Height (cm)	Total weight (g)	Stem diameter (mm)	Number of branches
0% Blue, 0B:20W:230R	55.32	62.93	6.48	18.07
8% Blue, 20B:20W:210R	59.29	69.34	7.08	16.17
16% Blue, 40B:20W:190R	60.01	78.93	7.55	15.59
24% Blue, 60B:20W:170R	62.29	76.97	6.67	16.19
32% Blue, 80B:20W:150R	60.13	72.50	6.67	17.73

TABLE 2: Average height, weight, diameter and number of branches taken after 63 days.

Рис. 4. Співвідношення показників наростання зеленої маси, висоти рослин, ваги рослин залежно від співвідношення різних довжин хвиль у спектрі освітлення

світлодіодного освітлення на зеленні, а саме на салат посівний і васильки справжні. Як видно з аналізу наукових робіт і статей, світлодіодне освітлення відіграє важливу роль у вирощуванні овочевих культур у сучасному світі. Завдяки світлодіодному енергоефективному освітленню можна досягати необхідних параметрів урожайності рослин салату посівного та васильків справжніх. Навіть більше, це не тільки дозволяє підвищити

якість і поживні властивості овочів, а і збільшити врожайність за зменшення витрат на виробництво та збільшення економічної ефективності виробництва. Покращення економічних показників виробництва дозволить підприємству спрямувати зароблені кошти на розвиток виробництва, а також на вдосконалення наявних потужностей, збільшення заробітних плат тощо. Також за допомогою світлодіодного освітлення і комбінації

різних типів світлодіодів із різним спектром можна отримувати рослини з необхідними морфологічними та якісними показниками, залежно від потреб. Усе це дозволить мінімізувати витрати, покращити якість продукції, яку отримує кінцевий споживач, і знизити негативний вплив на навколишнє середовище завдяки більш економному використанню природних ресурсів.

Тому нині надважливо зосередити свої зусилля на розширенні досліджень у сфері світлодіодного освітлення, впливу його на

рослини. Адже такого типу дослідження допоможуть розвивати не тільки агрономічну науку в галузі овочівництва закритого ґрунту, а й інші галузі, які можуть бути дотичними до цього. Особливо галузі напівпровідникового виробництва, а також виробництва електроніки.

Для отримання максимального врожаю від рослин, вирощених в умовах із контрольованим мікрокліматом, особливо в комерційному вирощуванні культур, необхідно оптимізувати умови освітлення.

Список використаної літератури

Ковальов М.М., Звездун О.М. Вирощування найпоширеніших сортів салату ромен на різних типах субстратів у NFT системах. Водні біоресурси та аквакультура. 2021. Ч. 1. С. 15–22. <https://doi.org/10.32851/wba.2021.1.3>.

Паламарчук І.І., Михальчук А.Я. Особливості росту та розвитку рослин салату посівного за гідропонного вирощування. Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України. 2024. Ч. 20. С. 1–5. [http://doi.org/10.31548/dopovidi.2\(108\).2024.012](http://doi.org/10.31548/dopovidi.2(108).2024.012).

Alrajhi A.A., Alsahli A.S., Alhelal I.M., Rihan H.Z., Fuller M.P., Alsadon A.A., Ibrahim A.A. The effect of LED light spectra on the growth, yield and nutritional value of red and green lettuce (*Lactuca sativa*). *Plants*. 2023. Vol. 12. № 463. <https://doi.org/10.3390/plants12030463>.

Chen R., Wang Z., Liu W., Ding Y., Zhang Q., Wang S. Side Lighting of Red, Blue and Green Spectral Combinations Altered the Growth, Yield and Quality of Lettuce (*Lactuca sativa* L. cv. "Yidali") in Plant Factory. *Plants*. 2023. Vol. 12. № 4147. <https://doi.org/10.3390/plants12244147>.

Cope K.R., Snowden M.C., Bugbee B. Photobiological interactions of blue light and photosynthetic photon flux: effects of monochromatic and broad-spectrum light sources. *Photochemistry and Photobiology*. 2014. Vol. 90 (4). P. 574–584. <https://doi.org/10.1111/php.12233>.

Eghbal E., Aliniaiefard S., Mehrjerdi M.Z., Abdi S., Hassani S.B., Rassaie T., Nazim S. Growth, phytochemical, and phytohormonal responses of basil to different light durations and intensities under constant daily light integrals. *BMC Plant Biology*. 2024. T. 24. № 935. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05637-w>.

Joshi J., Zhang, G., Shen S., Supaibulwatana K., Watanabe C.K., Yamori W. A combination of downward lighting and supplemental upward lighting improves plant growth in a closed plant factory with artificial lighting. *HortScience*. 2017. Vol. 52. № 6. P. 831–835 [Електронний ресурс]. URL: <https://mahidol.elsevierpure.com/en/publications/a-combination-of-downward-lighting-and-supplemental-upward-lighting/> (дата звернення: 10.08.2024).

Larsen D.H., Woltering E.J., Nicole C.C.S., Marcelis L.F.M. Response of basil growth and morphology to light intensity and spectrum in a vertical farm. *Frontiers in Plant Science*. 2020. Vol. 11. Article 597906. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.597906>.

McCree K.J. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agricultural Meteorology*. 1971. Vol. 9. P. 191–216. [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(71\)90022-7](https://doi.org/10.1016/0002-1571(71)90022-7).

Miao C., Yang S., Xu J., Wang H., Zhang Y., Cui J., Zhang H., Jin H., Lu P., He L. et al. Effects of light intensity on growth and quality of lettuce and spinach cultivars in a plant factory. *Plants*. 2023. Vol. 12. Article 3337. <https://doi.org/10.3390/plants12183337>.

Nair B.G., Bhoble S.J. A perspective perception on the applications of light-emitting diodes. *Luminescence*. 2015. № 30. P. 1167–1175. <https://doi.org/10.1002/bio.2919>.

Pacak I., Trojak M., Skowron E. The use of UV-A radiation for biofortification of lettuce and basil plants with antioxidant phenolic and flavonoid compounds. *Folia Biologica et Oecologica*. 2024. Vol. 18. P. 110–121.

Stutte G.W. Light-emitting diodes for manipulating the phytochrome apparatus. *Dynamac Corporation, Space Life Sciences Laboratory*. Mail Code DYN-3. Kennedy Space Center. FL 32899, 2009.

Wang J., Lu W., Tong Y., Yang Q. Leaf morphology, photosynthetic performance, chlorophyll fluorescence, stomatal development of lettuce (*Lactuca sativa* L.) exposed to different ratios of red light to blue light. *Frontiers in Plant Science*. 2016. Vol. 7. Article 250. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00250>.

Yelton M., Byrtus J., Chan G. Better tasting basil grown with LED lighting technology. *LumiGrow Inc.* Emeryville, CA. 2017. P. 50.

References

- Kovalov, M.M., & Zvezdun, O.M. (2021). Vyroshchuvannya nayposhyrenishykh sortiv salatu romen na riznykh typakh substrativ v NFT systemakh [Cultivation of the most common romaine lettuce varieties on different types of substrates in NFT systems]. *Vodni bioresursy ta akvakultura* [Water Bioresources and Aquaculture], 1, 15–22. <https://doi.org/10.32851/wba.2021.1.3> [in Ukrainian]
- Palamarchuk, I.I., & Mykhalchuk, A.Ya. (2024). Osoblyvosti rostu ta rozvytku roslyn salatu posivnoho za hydroponnoho vyroshchuvannya [Features of growth and development of lettuce plants (*Lactuca sativa*) under hydroponic cultivation]. *Naukovi dopovidi NUBiP* [Scientific Reports of NUBiP]. [https://doi.org/10.31548/dopovidi.2\(108\).2024.012](https://doi.org/10.31548/dopovidi.2(108).2024.012) [in Ukrainian].
- Alrajhi, A.A., Alsahli, A.S., Alhelal, I.M., Rihan, H.Z., Fuller, M.P., Alsadon, A.A., & Ibrahim, A.A. (2023). The effect of LED light spectra on the growth, yield and nutritional value of red and green lettuce (*Lactuca sativa*). *Plants*, 12 (463). <https://doi.org/10.3390/plants12030463> [in English].
- Chen, R., Wang, Z., Liu, W., Ding, Y., Zhang, Q., & Wang, S. (2023). Side lighting of red, blue, and green spectral combinations altered the growth, yield, and quality of lettuce (*Lactuca sativa* L. cv. “Yidali”) in plant factory. *Plants*, 12 (4147). <https://doi.org/10.3390/plants12244147> [in English].
- Cope, K.R., Snowden, M.C., & Bugbee, B. (2014). Photobiological interactions of blue light and photosynthetic photon flux: Effects of monochromatic and broad-spectrum light sources. *Photochemistry and Photobiology*, 90 (4), 574–584. <https://doi.org/10.1111/php.12233> [in English].
- Eghbal, E., Aliniaiefard, S., Mehrjerdi, M.Z., Abd, S., Hassani, S.B., Rassaie, T., & Nazim, S. (2024). Growth, phytochemical, and phytohormonal responses of basil to different light durations and intensities under constant daily light integra. *BMC Plant Biology*, 24 (935). <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05637-w> [in English].
- Joshi, J., Zhang, G., Shen, S., Supaibulwatana, K., Watanabe, C.K., & Yamori, W. (2017). A combination of downward lighting and supplemental upward lighting improves plant growth in a closed plant factory with artificial lighting. *HortScience*, 52 (6), 831–835. [Electronic resource] URL: <https://mahidol.elsevierpure.com/en/publications/a-combination-of-downward-lighting-and-supplemental-upward-lighti> (access date 10.08.2024) [in English].
- Larsen, D.H., Woltering, E.J., Nicole, C.C.S., & Marcelis, L.F.M. (2020). Response of basil growth and morphology to light intensity and spectrum in a vertical farm. *Frontiers in Plant Science*, 11, Article 597906. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.597906> [in English].
- McCree, K.J. (1971). The action spectrum, absorptance, and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agricultural Meteorology*, 9, 191–216. [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(71\)90022-7](https://doi.org/10.1016/0002-1571(71)90022-7) [in English].
- Miao, C., Yang, S., Xu, J., Wang, H., Zhang, Y., Cui, J., Zhang, H., Jin, H., Lu, P., & He, L., et al. (2023). Effects of light intensity on growth and quality of lettuce and spinach cultivars in a plant factory. *Plants*, 12, Article 3337. <https://doi.org/10.3390/plants12183337> [in English].
- Nair, B.G., & Bhoble, S.J. (2015). A perspective perception on the applications of light-emitting diodes. *Luminescence*, 30, 1167–1175. <https://doi.org/10.1002/bio.2919> [in English]
- Pacak, I., Trojak, M., & Skowron, E. (2024). The use of UV-A radiation for biofortification of lettuce and basil plants with antioxidant phenolic and flavonoid compounds. *Folia Biologica et Oecologica*, 18, 110–121 [in English].
- Stutte, G.W. (2009). Light-emitting diodes for manipulating the phytochrome apparatus. *Dynamac Corporation, Space Life Sciences Laboratory, Mail Code DYN-3, Kennedy Space Center, FL* [in English].
- Wang, J., Lu, W., Tong, Y., & Yang, Q. (2016). Leaf morphology, photosynthetic performance, chlorophyll fluorescence, stomatal development of lettuce (*Lactuca sativa* L.) exposed to different ratios of red light to blue light. *Frontiers in Plant Science*, 7, Article 250. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00250> [in English].
- Yelton, M., Byrtus, J., & Chan, G. (2017). Better tasting basil grown with LED lighting technology. *LumiGrow Inc.*, Emeryville, CA, 50 p. [in English].

Отримано: 17.01.2025

Прийнято: 31.01.2025