 © Авторы статьи / Authors of the article

СЕЛЕКЦИЯ, СЕМЕНОВОДСТВО И БИОТЕХНОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ/PLANT BREEDING, SEED PRODUCTION AND BIOTECHNOLOGY

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.72.5 EDN: FHIHXC

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДВУХПИКОВОГО КРАСНО-СИНЕГО И УЗКОПОЛОСНОГО КРАСНОГО СВЕТОДИОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПРОДУКТИВНОСТИ МИКРОЗЕЛЕНИ РЕДИСА В УСЛОВИЯХ АЭРОПОНИКИ

Научная статья

Ветчинников А.А.[1], Уромова И.П.[2,] *, Пиманова Н.А.[3]
[1] ORCID : 0000-0002-5533-2526;
[2] ORCID : 0000-0003-1000-3603;
[3] ORCID : 0000-0003-1284-8765;
[1] Нижегородский государственный агротехнологический университет им. Л.Я. Флорентьева, Нижний Новгород, Российская Федерация
[2, 3] Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина, Нижний Новгород, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (uromova2012[at]yandex.ru)

Предложена: 08.06.2026; Принята: 24.07.2026; Опубликована: 19.08.2026

Аннотация

В статье представлены результаты совместного исследования Нижегородского государственного агротехнологического университета и Нижегородского государственного педагогического университета имени К. Минина, посвящённого сравнительной оценке влияния различных вариантов светодиодного освещения на продуктивность микрозелени редиса (Raphanus sativus L.) при выращивании в условиях аэропонной культуры. Работа выполнена в рамках разработки и апробации малогабаритных аэропонных установок, предназначенных для научных исследований, образовательного процесса и практической подготовки обучающихся в области агробиотехнологий. Сравнивали два варианта светодиодного освещения одинаковой установленной электрической мощности: красно-синее и узкополосное красное. Установлено, что применение узкополосного красного освещения обеспечивало увеличение урожайности микрозелени в состоянии естественной влажности с 9,227 до 15,502 г на 1 г высеянных семян (+68%). При этом урожайность по абсолютно сухому веществу изменялась незначительно — с 0,766 до 0,794 г на 1 г семян (+4%), а содержание воды в растительной биомассе возрастало с 92 до 95%. Полученные результаты свидетельствуют о том, что увеличение урожайности при использовании красного светодиодного освещения обусловлено преимущественно повышением содержания воды в тканях растений, тогда как накопление органического вещества изменяется несущественно. Результаты исследования могут быть использованы при выборе световых режимов для аэропонного выращивания микрозелени, а также в учебной и научно-исследовательской деятельности университетов аграрного и педагогического профиля.

Ключевые слова: микрозелень; редис; аэропоника; светодиодное освещение; продуктивность; абсолютно сухое вещество; контролируемое выращивание; агробиотехнологии; световая среда.

A COMPARATIVE EVALUATION OF THE EFFECTS OF TWO-PEAK RED-BLUE AND NARROW-BAND RED LIGHT-EMITTING DIODE RADIATION ON THE PRODUCTIVITY OF RADISH MICROGREENS UNDER AEROPONIC CONDITIONS

Research article

Vetchinnikov A.A.[1], Uromova I.P.[2,] *, Pimanova N.A.[3]
[1] ORCID : 0000-0002-5533-2526;
[2] ORCID : 0000-0003-1000-3603;
[3] ORCID : 0000-0003-1284-8765;
[1] L.Ya.Florentiev Nizhny Novgorod State Agrotechnological University, Nizhny Novgorod, Russian Federation
[2, 3] Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University, Nizhny Novgorod, Russian Federation

* Corresponding author (uromova2012[at]yandex.ru)

Suggested: 08.06.2026; Accepted: 24.07.2026; Published: 19.08.2026

Abstract

The article presents the results of a joint study conducted by Nizhny Novgorod State Agrotechnological University and the K. Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University, focusing on a comparative evaluation of the effect of various light-emitting diode lighting variations on the productivity of radish microgreens (Raphanus sativus L.) when grown using aeroponic culture. The work was carried out as part of the development and testing of compact aeroponic systems intended for scientific research, the educational process and the practical training of students in the field of agrobiotechnology. Two LED lighting options with the same installed electrical power were compared: red-blue and narrow-band red. It was found that the use of narrow-band red lighting resulted in an increase in microgreen yield under natural humidity conditions from 9.227 to 15.502 g per 1 g of sown seeds (+68%) At the same time, the yield in terms of absolute dry substance changed only slightly — from

 © Авторы статьи / Authors of the article

0.766 to 0.794 g per 1 g of seeds (+4%), and the water content in the plant biomass increased from 92 to 95%. The results obtained indicate that the increase in yield when using red LED lighting is primarily due to an increase in the water content of plant tissues, whereas the accumulation of organic matter changes only slightly. The results of the study can be used when selecting lighting regimes for aeroponic microgreen cultivation, as well as in teaching and research activities at agricultural and pedagogical universities.

Keywords: microgreens, radish, aeroponics, LED lighting, productivity, absolute dry substance, controlled cultivation, agrobiotechnology, light environment.

Введение

Аэропоника относится к современным беспочвенным технологиям культивирования растений, при которых корневая система находится в воздушной среде и периодически орошается тонкодисперсным питательным раствором. В отличие от субстратных и гидропонных систем, аэропонная культура обеспечивает повышенную аэрацию корневой зоны, что способствует активизации дыхания корней, поглощения элементов минерального питания и реализации ростового потенциала растений. Использование аэропонных установок позволяет круглогодично поддерживать заданные параметры среды выращивания, включая температуру, влажность, режим минерального питания и световую среду, независимо от сезонных и погодных факторов [1], [2], [3].

В условиях регулируемой агроэкосистемы одним из ведущих факторов, определяющих рост, морфогенез и продуктивность растений, является искусственное оптическое излучение. Для быстрорастущих культур, в том числе микрозелени, существенное значение имеют не только уровень фотосинтетически активной радиации и продолжительность фотопериода, но и спектральное распределение излучения. Подбор спектральных характеристик светодиодного освещения в аэропонных системах является важным условием направленного управления ростовыми процессами, формированием биомассы и получением продукции с заданными морфофизиологическими параметрами [4], [5], [6], [14].

Спектральный состав световой среды оказывает непосредственное влияние на функционирование фоторецепторных систем растений, включая фитохромы, криптохромы и фототропины. Отдельные участки спектра воспринимаются растением не только как энергетический ресурс для фотосинтеза, но и как регуляторный сигнал, определяющий направление фотоморфогенетических реакций. Согласно данным ряда исследований [7], [8], [9], изменение соотношения спектральных компонентов способно вызывать выраженные различия в росте микрозелени, включая высоту гипокотиля, размеры и окраску семядольных листьев, скорость накопления биомассы, а также содержание отдельных групп вторичных метаболитов.

Фотоморфогенетические реакции проростков в значительной степени зависят от качества световой среды. В зависимости от преобладания синей или красной области спектра растения могут формировать более компактный морфотип либо, напротив, демонстрировать усиленное вытягивание надземной части и изменение соотношения между побегом и корневой системой. Исследования других авторов показывают, что оптимизация спектрального состава освещения в условиях контролируемой среды может повышать эффективность выращивания микрозелени как по показателям урожайности, так и по пищевой и биологической ценности продукции [10], [11], [12]. Вместе с тем влияние конкретных светодиодных спектральных режимов, в частности двухпикового красно-синего и узкополосного красного излучения, на накопление биомассы в состоянии естественной влажности и абсолютно сухого вещества микрозелени изучено недостаточно, что определяет научную и практическую актуальность настоящего исследования.

Цель исследования заключалась в оценке влияния двух вариантов спектрального состава светодиодного излучения — двухпикового красно-синего и узкополосного красного — на продуктивность микрозелени редиса (*Raphanus sativus* L.) при выращивании в условиях аэропонной культуры.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1) провести сравнительную оценку влияния двухпикового красно-синего и узкополосного красного светодиодного излучения на накопление массы в состоянии естественной влажности и абсолютно сухого вещества проростков редиса;

2) установить особенности распределения биомассы в состоянии естественной влажности и абсолютно сухого вещества между надземной частью и корневой системой проростков редиса в зависимости от спектрального режима освещения;

3) оценить продуктивность микрозелени редиса в пересчёте на единицу массы высеянных семян при выращивании в условиях аэропонной культуры под действием исследуемых вариантов светодиодного освещения.

Методы и принципы исследования

Лабораторный опыт проводили в условиях контролируемой аэропонной культуры с использованием экспериментальной установки, включающей две автономные вегетационные камеры. Конструктивное разделение камер позволяло одновременно выращивать растения при одинаковых условиях культивирования, но при различных вариантах светодиодного освещения.

В качестве изучаемого фактора сравнивали два серийных светодиодных излучателя одинаковой номинальной электрической мощности (50 Вт), отличавшихся спектральным составом излучения. Оба светильника размещали на расстоянии 40 см от поверхности посевов. Такое расстояние соответствует типовым технологическим режимам выращивания микрозелени и обеспечивает равномерное освещение посевов без локального теплового воздействия на растения. Характеристика экспериментальных вариантов приведена в таблице 1.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Таблица 1 - Характеристика экспериментальных вариантов световой среды при культивировании микрозелени редиса в условиях аэропоники

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.72.5.1

№	Условное обозначение	Источник света	Спектральная характеристика
1	Красно-синее излучение	LED-излучатель 50 Вт, пиковые длины волн 450 и 620 нм	Двухпиковое красно-синее светодиодное излучение с максимумами в синей и красной областях спектра — 450 и 620 нм
2	Красное излучение	LED-излучатель 50 Вт, максимум излучения 650 нм	Узкополосное красное светодиодное излучение с максимумом в области λ≈650 нм

Исследование носило прикладной агротехнологический характер и было направлено на сравнительную оценку эффективности двух практически применяемых вариантов светодиодного освещения в условиях аэропонного выращивания микрозелени. Поэтому сравнение вариантов осуществляли при одинаковой установленной электрической мощности светильников, являющейся одним из основных эксплуатационных параметров при выборе осветительного оборудования в производственной практике. Плотность потока фотосинтетически активных фотонов (PPFD) и суточную световую дозу (DLI) в рамках настоящего исследования не определяли. В связи с этим полученные результаты характеризуют сравнительную эффективность исследованных вариантов светодиодного освещения при их практическом использовании и должны интерпретироваться с учётом указанного ограничения.

Перед посевом семена дезинфицировали в 3%-ном растворе перекиси водорода в течение 10 минут, после чего трижды промывали водой. Для синхронизации прорастания после набухания семена выдерживали при температуре около +4 °С в течение 12 часов.

После подготовки семена высевали в чашки Петри из расчёта 5 г на чашку. Каждый вариант освещения изучали в трёхкратной повторности. Повторностями служили отдельные чашки Петри, размещённые в пределах соответствующей вегетационной камеры. Каждому варианту освещения соответствовала отдельная камера, поэтому результаты характеризуют сравнительную эффективность исследованных вариантов светодиодного освещения в условиях используемой экспериментальной установки.

Продолжительность выращивания составляла 7 суток. По окончании опыта определяли продуктивность микрозелени, массу побега, корневой системы и общую массу проростков. Урожайность определяли путём взвешивания всей биомассы микрозелени, полученной с каждой чашки Петри. Полученные значения затем пересчитывали на 1 г высеянных семян. Определения выполняли в состоянии естественной влажности и после высушивания до абсолютно сухого состояния.

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили методом дисперсионного анализа по Б. А. Доспехову с расчётом наименьшей существенной разности ($НСР_{05}$) [13]. Вычисления выполняли с использованием Microsoft Excel.

Основные результаты и обсуждения

Одним из основных факторов, определяющих эффективность выращивания микрозелени в условиях контролируемой среды, является световой режим. Изменение спектрального состава светодиодного освещения оказывает влияние на интенсивность ростовых процессов, распределение биомассы между органами растений и, как следствие, на продуктивность культуры. Поэтому сравнительная оценка формирования биомассы при естественной и влажности и в абсолютно сухом веществе при различных вариантах освещения представляет практический интерес при выборе световых режимов для аэропонных технологий выращивания микрозелени.

Первоначальную оценку эффективности исследуемых вариантов светодиодного освещения проводили по массе микрозелени, полученной с одной учётной повторности, в состоянии естественной влажности. Данный показатель характеризует общий выход продукции и позволяет оценить влияние исследуемых вариантов освещения на формирование биомассы побега, корневой системы и растения в целом.

Результаты определения массы микрозелени редиса в состоянии естественной влажности представлены в таблице 2.

© Авторы статьи / Authors of the article

Таблица 2 - Влияние спектрального варианта светодиодного освещения на массу микрозелени редиса в состоянии естественной влажности, полученную с одной учётной повторности

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.72.5.2

Вариант	Побег			Корневая система			Общая биомасса		
	масса, г	± к контролю		масса, г	± к контролю		масса, г	± к контролю	
		г	%		г	%		г	%
Красно-синее излучение	31,628	-	-	14,507	-	-	46,135	-	-
Красное излучение	50,782	19,153	61	26,727	12,22	84	77,508	31,373	68

© Авторы статьи / Authors of the article

Вариант	Побег			Корневая система			Общая биомасса		
	масса, г	± к контролю		масса, г	± к контролю		масса, г	± к контролю	
		г	%		г	%		г	%
$НСР_{05}$	-	12,14	-	-	2,103	-	-	13,557	-

 © Авторы статьи / Authors of the article

Результаты, представленные в таблице 2, свидетельствуют о выраженном влиянии спектрального состава светодиодного освещения на формирование биомассы в состоянии естественной влажности микрозелени редиса. Использование узкополосного красного излучения обеспечивало достоверное увеличение массы побега, корневой системы и общей биомассы по сравнению с вариантом красно-синего освещения. Наиболее выраженный эффект отмечен для корневой системы, масса которой увеличилась на 84%, тогда как прирост массы побега и общей биомассы составил соответственно 61 и 68%. Во всех случаях различия между вариантами превышали величину $НСР_{05}$, что свидетельствует об их статистической значимости.

Полученные результаты указывают на высокую чувствительность микрозелени редиса к изменению спектрального состава световой среды. Увеличение массы урожая при использовании узкополосного красного светодиодного излучения согласуется с известными особенностями фотоморфогенетических реакций растений при недостатке синей составляющей спектра. Вместе с тем по данным таблицы 2 невозможно судить, связано ли увеличение массы урожая с накоплением органического вещества либо преимущественно обусловлено изменением водного режима тканей, поэтому для дальнейшей интерпретации результатов необходим анализ абсолютно сухого вещества.

Определение массы абсолютно сухого вещества позволяет оценить эффективность накопления органического вещества независимо от содержания воды в тканях растений. В отличие от биомассы при естественной влажности, этот показатель характеризует количество веществ, синтезированных в процессе фотосинтеза и включённых в состав структурных и запасных соединений растения. Поэтому сравнение вариантов освещения по массе абсолютно сухого вещества позволяет установить, сопровождается ли увеличение урожая реальным усилением продукционного процесса или обусловлено преимущественно изменением содержания воды в тканях растений. Изменение массы абсолютно сухого вещества микрозелени редиса в зависимости от спектрального состава светодиодного освещения представлено в таблице 3.

© Авторы статьи / Authors of the article

Таблица 3 - Влияние спектрального варианта светодиодного освещения на массу микрозелени редиса в состоянии абсолютно сухого вещества, полученную с одной учётной повторности

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.72.5.3

Вариант	Побег			Корневая система			Общая биомасса		
	масса, г	± к контролю		масса, г	± к контролю		масса, г	± к контролю	
		г	%		г	%		г	%
Красно-синее излучение	2,537	-	-	1,291	-	-	3,828	-	-
Красное излучение	2,136	-0,401	-16	1,834	0,543	42	3,97	0,142	4

© Авторы статьи / Authors of the article

Вариант	Побег			Корневая система			Общая биомасса		
	масса, г	± к контролю		масса, г	± к контролю		масса, г	± к контролю	
		г	%		г	%		г	%
$НСР_{05}$	-	0,559	-	-	0,157	-	-	0,618	-

 © Авторы статьи / Authors of the article

Как следует из данных таблицы 3, характер накопления абсолютно сухого вещества существенно отличается от изменений, наблюдавшихся для биомассы в состоянии естественной влажности. Несмотря на значительное увеличение массы урожая в состоянии естественной влажности при использовании узкополосного красного светодиодного освещения, достоверного увеличения общей массы абсолютно сухого вещества не выявлено. Различия между вариантами составили лишь 4% и не превышали величину $НСР_{05}$, что свидетельствует об отсутствии статистически значимого влияния исследуемого режима освещения на накопление органического вещества в растениях.

Вместе с тем распределение абсолютно сухого вещества между органами растений изменялось. При использовании красного светодиодного освещения масса побега уменьшалась на 16% по сравнению с вариантом красно-синего освещения, тогда как масса корневой системы, напротив, возрастала на 42%. Полученные данные свидетельствуют не столько об увеличении общего накопления сухого вещества, сколько об изменении характера его распределения между побегом и корневой системой.

Узкополосное красное светодиодное освещение не приводило к существенному усилению продукционного процесса, а преимущественно изменяло морфогенетическую реакцию растений. Полученные результаты согласуются с представлениями о том, что изменение спектрального состава световой среды способно влиять на характер фотоморфогенетических реакций растений и распределение ассимилятов между органами без существенного изменения общего накопления абсолютно сухого вещества [14], [15].

Поскольку продуктивность микрозелени в производственной практике принято оценивать в пересчёте на единицу массы высеянных семян, полученные экспериментальные данные были дополнительно пересчитаны на 1 г посевного материала. Такой подход позволяет сопоставить эффективность исследуемых вариантов светодиодного освещения независимо от массы учётной повторности и оценить практическую целесообразность их применения при выращивании микрозелени.

Наряду с урожайностью в состоянии естественной влажности в таблице 4 приведены показатели урожайности по абсолютно сухому веществу и рассчитанное содержание влаги в продукции. Совместный анализ этих показателей позволяет установить, обусловлено ли увеличение продуктивности реальным накоплением органического вещества или преимущественно связано с изменением степени оводнённости тканей растений.

© Авторы статьи / Authors of the article

Таблица 4 - Продуктивность микрозелени редиса в пересчёте на 1 г высеянных семян при различных вариантах светодиодного освещения

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.72.5.4

Вариант	Урожайность, г/1 г семян		Влажность, %
	естественная влажность	абсолютно сухое вещество	
Красно-синее излучение	9,227	0,766	92
Красное излучение	15,502	0,794	95

 © Авторы статьи / Authors of the article

Как следует из данных таблицы 4, использование узкополосного красного светодиодного освещения обеспечивало существенное увеличение продуктивности микрозелени редиса в пересчёте на 1 г высеянных семян. Урожайность в состоянии естественной влажности возрастала с 9,227 до 15,502 г, что соответствует увеличению на 68%. Вместе с тем урожайность по абсолютно сухому веществу изменялась незначительно и составила соответственно 0,766 и 0,794 г на 1 г семян. При этом содержание влаги в растительной биомассе увеличивалось с 92 до 95%.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что повышение продуктивности микрозелени редиса при использовании красного светодиодного освещения было обусловлено преимущественно увеличением содержания воды в тканях растений, тогда как накопление абсолютно сухого вещества изменялось несущественно. Следовательно, оценка эффективности различных вариантов светодиодного освещения только по массе растений в состоянии естественной влажности может приводить к переоценке их влияния на накопление органического вещества. В условиях аэропоники такой эффект представляет практический интерес, поскольку технология позволяет использовать в качестве товарной продукции не только побег, но и корневую систему, не контактирующую с почвенным субстратом. Поэтому при оценке продуктивности в настоящем исследовании учитывали общую биомассу растений, что наиболее полно отражает технологическую эффективность исследуемых вариантов светодиодного освещения при выращивании микрозелени.

Заключение

Проведённые исследования показали, что спектральный состав светодиодного освещения оказывает существенное влияние на продуктивность микрозелени редиса, выращиваемой в условиях аэропонной культуры. Использование узкополосного красного светодиодного излучения обеспечило увеличение урожайности в состоянии естественной влажности на 68% по сравнению с красно-синим освещением.

Вместе с тем анализ абсолютно сухого вещества показал отсутствие статистически значимых различий между исследуемыми вариантами освещения. Это свидетельствует о том, что увеличение урожайности при использовании красного светодиодного излучения обусловлено преимущественно повышением содержания воды в растительных тканях, а не существенным усилением накопления органического вещества.

Установлено также, что изменение спектрального состава освещения сопровождалось перераспределением абсолютно сухого вещества между органами растений. При красном освещении отмечалось снижение массы побега и увеличение массы корневой системы, тогда как общее накопление абсолютно сухого вещества оставалось практически неизменным.

Практическая ценность полученных результатов заключается в возможности использования узкополосного красного светодиодного освещения для повышения выхода товарной продукции при выращивании микрозелени редиса в аэропонных установках. При этом оценку эффективности различных световых режимов целесообразно проводить не только по урожайности в состоянии естественной влажности, но и по массе абсолютно сухого вещества, позволяющей объективно характеризовать накопление органического вещества растениями.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Яковлев И.В., Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань Российская Федерация
DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.72.5.5

Conflict of Interest

None declared.

Review

Iakovlev I.V., Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan Russian Federation
DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.72.5.5

Список литературы / References

1. Carotti L. Improving water use efficiency in vertical farming: Effects of growing systems, far-red radiation and planting density on lettuce cultivation / L. Carotti, A. Pistillo, I. Zauli [et al.] // Agricultural Water Management. — 2023. — Vol. 285. — Art. 108365. — DOI: 10.1016/j.agwat.2023.108365.

2. Regmi A. Comparing resource use efficiencies in hydroponic and aeroponic production systems / A. Regmi, D. Rueda-Kunz, H. Liu [et al.] // Technology in Horticulture. — 2024. — Vol. 4. — Art. e005. — DOI: 10.48130/tihort-0024-0002.

3. Schmidt Rivera X. The role of aeroponic container farms in sustainable food systems — The environmental credentials / X. Schmidt Rivera, B. Rodgers, T. Odanye [et al.] // Science of the Total Environment. — 2023. — Vol. 860. — Art. 160420. — DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.160420.

4. Budavari N. An Overview on the Use of Artificial Lighting for Sustainable Lettuce and Microgreens Production in an Indoor Vertical Farming System / N. Budavari, Z. Pek, L. Helyes [et al.] // Horticulturae. — 2024. — Vol. 10, № 9. — Art. 938. — DOI: 10.3390/horticulturae10090938.

5. Pescarini H.B. Updates on Microgreens Grown under Artificial Lighting: Scientific Advances in the Last Two Decades / H.B. Pescarini, V.G. da Silva, S. da C. Mello [et al.] // Horticulturae. — 2023. — Vol. 9, № 8. — Art. 864. — DOI: 10.3390/horticulturae9080864.

 © Авторы статьи / Authors of the article

6. Cowden R.J. The Effects of Light Spectrum and Intensity, Seeding Density, and Fertilization on Biomass, Morphology, and Resource Use Efficiency in Three Species of Brassicaceae Microgreens / R.J. Cowden, B. Markussen, B.B. Ghaley [et al.] // Plants. — 2024. — Vol. 13, № 1. — Art. 124. — DOI: 10.3390/plants13010124.

7. Wei Y. The Role of Light Quality in Regulating Early Seedling Development / Y. Wei, S. Wang, D. Yu // Plants. — 2023. — Vol. 12, № 14. — Art. 2746. — DOI: 10.3390/plants12142746.

8. Huq E. Light signaling in plants – a selective history / E. Huq, C. Lin, P.H. Quail // Plant Physiology. — 2024. — Vol. 195, № 1. — P. 213–231. — DOI: 10.1093/plphys/kiae110.

9. Wang X. The two action mechanisms of plant cryptochromes / X. Wang, C. Lin // Trends in Plant Science. — 2025. — Vol. 30, № 7. — P. 775–791. — DOI: 10.1016/j.tplants.2024.12.001.

10. Orlando M. The Inclusion of Green Light in a Red and Blue Light Background Impact the Growth and Functional Quality of Vegetable and Flower Microgreen Species / M. Orlando, A. Trivellini, L. Incrocci [et al.] // Horticulturae. — 2022. — Vol. 8, № 3. — Art. 217. — DOI: 10.3390/horticulturae8030217.

11. Brazaitytė A. Effect of Different Ratios of Blue and Red LED Light on Brassicaceae Microgreens under a Controlled Environment / A. Brazaitytė, J. Miliauskienė, V. Vaštakaitė-Kairienė [et al.] // Plants. — 2021. — Vol. 10, № 4. — Art. 801. — DOI: 10.3390/plants10040801.

12. Mir S. Effects of Light Intensity and Spectrum Mix on Biomass, Growth and Resource Use Efficiency in Microgreen Species / S. Mir, R. Krumins, L. Purmale [et al.] // Agronomy. — 2024. — Vol. 14, № 12. — Art. 2895. — DOI: 10.3390/agronomy14122895.

13. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) / Б.А. Доспехов. — 5-е изд., перераб. и доп. — Москва : Агропромиздат, 1985. — 351 с.

14. Zhao X. Study of Gibberellin Homeostasis and Cryptochrome-Mediated Blue Light Inhibition of Hypocotyl Elongation / X. Zhao, X. Yu, E. Foo [et al.] / Plant Physiology. — 2007. — Vol. 145, № 1. — P. 106–118. — DOI: 10.1104/pp.107.099838.

15. Wang Q. New insights into the mechanisms of phytochrome–cryptochrome coaction / Q. Wang, Q. Liu, X. Wang [et al.] // New Phytologist. — 2018. — Vol. 217, № 2. — P. 481–489. — DOI: 10.1111/nph.14886.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Carotti L. Improving water use efficiency in vertical farming: Effects of growing systems, far-red radiation and planting density on lettuce cultivation / L. Carotti, A. Pistillo, I. Zauli [et al.] // Agricultural Water Management. — 2023. — Vol. 285. — Art. 108365. — DOI: 10.1016/j.agwat.2023.108365.

2. Regmi A. Comparing resource use efficiencies in hydroponic and aeroponic production systems / A. Regmi, D. Rueda-Kunz, H. Liu [et al.] // Technology in Horticulture. — 2024. — Vol. 4. — Art. e005. — DOI: 10.48130/tihort-0024-0002.

3. Schmidt Rivera X. The role of aeroponic container farms in sustainable food systems — The environmental credentials / X. Schmidt Rivera, B. Rodgers, T. Odanye [et al.] // Science of the Total Environment. — 2023. — Vol. 860. — Art. 160420. — DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.160420.

4. Budavari N. An Overview on the Use of Artificial Lighting for Sustainable Lettuce and Microgreens Production in an Indoor Vertical Farming System / N. Budavari, Z. Pek, L. Helyes [et al.] // Horticulturae. — 2024. — Vol. 10, № 9. — Art. 938. — DOI: 10.3390/horticulturae10090938.

5. Pescarini H.B. Updates on Microgreens Grown under Artificial Lighting: Scientific Advances in the Last Two Decades / H.B. Pescarini, V.G. da Silva, S. da C. Mello [et al.] // Horticulturae. — 2023. — Vol. 9, № 8. — Art. 864. — DOI: 10.3390/horticulturae9080864.

6. Cowden R.J. The Effects of Light Spectrum and Intensity, Seeding Density, and Fertilization on Biomass, Morphology, and Resource Use Efficiency in Three Species of Brassicaceae Microgreens / R.J. Cowden, B. Markussen, B.B. Ghaley [et al.] // Plants. — 2024. — Vol. 13, № 1. — Art. 124. — DOI: 10.3390/plants13010124.

7. Wei Y. The Role of Light Quality in Regulating Early Seedling Development / Y. Wei, S. Wang, D. Yu // Plants. — 2023. — Vol. 12, № 14. — Art. 2746. — DOI: 10.3390/plants12142746.

8. Huq E. Light signaling in plants – a selective history / E. Huq, C. Lin, P.H. Quail // Plant Physiology. — 2024. — Vol. 195, № 1. — P. 213–231. — DOI: 10.1093/plphys/kiae110.

9. Wang X. The two action mechanisms of plant cryptochromes / X. Wang, C. Lin // Trends in Plant Science. — 2025. — Vol. 30, № 7. — P. 775–791. — DOI: 10.1016/j.tplants.2024.12.001.

10. Orlando M. The Inclusion of Green Light in a Red and Blue Light Background Impact the Growth and Functional Quality of Vegetable and Flower Microgreen Species / M. Orlando, A. Trivellini, L. Incrocci [et al.] // Horticulturae. — 2022. — Vol. 8, № 3. — Art. 217. — DOI: 10.3390/horticulturae8030217.

11. Brazaitytė A. Effect of Different Ratios of Blue and Red LED Light on Brassicaceae Microgreens under a Controlled Environment / A. Brazaitytė, J. Miliauskienė, V. Vaštakaitė-Kairienė [et al.] // Plants. — 2021. — Vol. 10, № 4. — Art. 801. — DOI: 10.3390/plants10040801.

12. Mir S. Effects of Light Intensity and Spectrum Mix on Biomass, Growth and Resource Use Efficiency in Microgreen Species / S. Mir, R. Krumins, L. Purmale [et al.] // Agronomy. — 2024. — Vol. 14, № 12. — Art. 2895. — DOI: 10.3390/agronomy14122895.

13. Dospekhov B.A. Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovaniy) [Field experiment methodology (with fundamentals of statistical processing of research results)] / B.A. Dospekhov. — 5th ed., rev. and suppl. — Moscow : Agropromizdat, 1985. — 351 p. [in Russian]

 © Авторы статьи / Authors of the article

14. Zhao X. Study of Gibberellin Homeostasis and Cryptochrome-Mediated Blue Light Inhibition of Hypocotyl Elongation / X. Zhao, X. Yu, E. Foo [et al.] / Plant Physiology. — 2007. — Vol. 145, № 1. — P. 106–118. — DOI: 10.1104/pp.107.099838.

15. Wang Q. New insights into the mechanisms of phytochrome–cryptochrome coaction / Q. Wang, Q. Liu, X. Wang [et al.] // New Phytologist. — 2018. — Vol. 217, № 2. — P. 481–489. — DOI: 10.1111/nph.14886.