

**СЕЛЕКЦИЯ, СЕМЕНОВОДСТВО И БИОТЕХНОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ/PLANT BREEDING, SEED PRODUCTION AND BIOTECHNOLOGY**DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.67.2>

EDN: TAJYMS

ВЛИЯНИЕ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО КРАСНОГО СВЕТА НА РОСТ И РАЗВИТИЕ МИКРОЗЕЛЕНИ РЕДИСА В УСЛОВИЯХ АЭРОПОНИКИ

Научная статья

Ветчинников А.А.¹, Уромова И.П.^{2,*}, Пиманова Н.А.³¹ORCID : 0000-0002-5533-2526;²ORCID : 0000-0003-1000-3603;³ORCID : 0000-0003-1284-8765;¹Нижегородский 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)

Аннотация

В работе представлены результаты исследования влияния спектрального состава светодиодного освещения на рост и раннее развитие микрозелени редиса (*Raphanus sativus* L.), выращенной в условиях аэропоники. Эксперимент проводился в лаборатории кафедры агрохимии и агроэкологии Нижегородского ГАТУ им. Л.Я. Флорентьева с использованием лабораторного макета аэропонной установки; анализ растительного материала выполнен на кафедре «БЭиМО» Мининского университета. В исследовании рассматривались два световых режима — полный спектр и монохроматический красный свет ($\lambda \approx 650$ нм). Установлено, что красное освещение обеспечивало достоверное увеличение длины как вегетативной части проростков, так и корневой системы по сравнению с полным спектром. Кроме того, монохроматический красный свет способствовал более активному формированию боковых органов: число боковых корешков на проростке было выше на 74% по отношению к варианту с полным спектром. Полученные результаты подчёркивают ключевую роль спектрального состава освещения в регуляции морфогенеза микрозелени и подтверждают его значение для оптимизации условий аэропонного выращивания.

Ключевые слова: аэропоника, спектральный состав, морфологические показатели, красный свет, синий цвет.**THE EFFECT OF MONOCHROMATIC RED LIGHT ON THE GROWTH AND DEVELOPMENT OF RADISH MICROGREENS UNDER AEROPONIC CONDITIONS**

Research article

Vetchinnikov A.A.¹, Uromova I.P.^{2,*}, Pimanova N.A.³¹ORCID : 0000-0002-5533-2526;²ORCID : 0000-0003-1000-3603;³ORCID : 0000-0003-1284-8765;¹L.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)

Abstract

The work presents the results of a study of the effect of the spectral composition of LED-based lighting on the growth and early development of radish microgreens (*Raphanus sativus* L.) grown under aeroponic conditions. The experiment was conducted in the laboratory of the Department of Agrochemistry and Agroecology at the L.Ya. Florentyev Nizhny Novgorod State Agricultural University using a laboratory model of an aeroponic system; analysis of the plant material was carried out at the Department of 'Biology, Ecology and Teaching Methods' at Minin University. The study examined two light regimes: full spectrum and monochromatic red light ($\lambda \approx 650$ nm). It was found that red lighting resulted in a significant increase in the length of both the vegetative part of the seedlings and the root system compared to full spectrum lighting. Furthermore, monochromatic red light contributed to more active formation of lateral root organs: the number of lateral rootlets per seedling was 74% higher than in the full-spectrum treatment. The obtained results highlight the key role of the spectral composition of lighting in regulating the morphogenesis of microgreens and confirm its importance for optimising aeroponic cultivation conditions.

Keywords: aeroponics, spectral composition, morphological parameters, red light, blue light.**Введение**

Аэропоника представляет собой метод выращивания растений без использования почвы. В такой системе корневая система растений не погружена в субстрат, а подвешена в воздухе и регулярно орошается питательным раствором. Благодаря этому корни получают обильное снабжение кислородом, что способствует ускоренному росту и эффективному поглощению питательных веществ. Аэропонные установки позволяют поддерживать оптимальные условия выращивания круглый год, независимо от внешних факторов. В условиях полной контролируемости среды

(влажность, температура, питание) особое значение приобретает освещение как ключевой фактор роста. В частности, для таких быстрорастущих культур, как микрозелень, спектральный состав и интенсивность света оказываются решающими для их развития. Поэтому при aeropонном методе выращивания тщательно продуманная система искусственного освещения необходима для обеспечения высокой продуктивности [4], [9], [11].

Спектральный состав света — сочетание различных длин волн от ультрафиолетовой до ближней инфракрасной области — напрямую влияет на работу фотоморфогенетических рецепторов растений. Разные участки спектра служат сигналами, запускающими регуляторные процессы развития (фотоморфогенез). Есть мнение [2], [3], [7], [10], что изменение соотношения спектральных компонентов может приводить к заметным изменениям в росте микрозелени: высоте стебельков, размеру и окраске семядолей, скорости накопления биомассы, а также содержанию вторичных метаболитов. Фотоморфогенез проростков, то есть формирование их структуры под влиянием света, тонко настраивается спектром: растения могут оставаться компактными или, наоборот, вытягиваться в зависимости от качества света. Исследования других авторов также показывают, что оптимизация спектрального состава в контролируемых условиях способна существенно повысить эффективность выращивания микрозелени как по урожайности, так и по питательной ценности продукции [11], [12]. Однако, несмотря на определенное количество работ, посвященных исследованию отдельных зон видимого спектра — прежде всего красного, синего и зеленого на ростовые процессы микрозелени данная проблема изучена недостаточно и привлекает внимание ученых и агротехнологов. В связи с этим целью нашего исследования было установить влияние спектрального состава искусственного освещения на морфогенетические параметры микрозелени редиса (*Raphanus sativus* L.) при выращивании в условиях aeropонной культуры. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Провести сравнительную оценку морфологических показателей проростков редиса при воздействии различных спектральных вариантов освещения.
2. Охарактеризовать особенности формирования корневой системы, включая развитие боковых корешков, в зависимости от качества светового потока.

Методы и принципы исследования

Лабораторный эксперимент проводился в aeropонной установке. Данная установка представляет собой две независимые вегетационные камеры, позволяющие параллельно проводить эксперименты с различными спектрами излучения. В настоящем исследовании отличия сводились к спектральному составу освещения, под влиянием которого происходил рост и развитие проростков. Схема проведения эксперимента представлена в таблице 1.

Таблица 1 - Схема экспериментальных вариантов освещения микрозелени редиса

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.67.2.1>

№	Условное обозначение	Источник света	Спектральная характеристика
1	FS (Full Spectrum)	LED-излучатель 50 Вт, пиковые длины волн 450 нм и 620 нм	полный спектр (400–700 нм), пики на 450 нм и 620 нм
2	R (Red Light)	LED-излучатель 50 Вт, один пик 650 нм	монохроматический красный свет ($\lambda \approx 650$ нм).

В работе объектом исследования служила микрозелень редиса (*Raphanus sativus* L.), которая характеризовалась быстрым и дружным прорастанием семян, обусловленным значительными запасами питательных веществ в семени (высокой семенной энергетикой).

Перед посевом семена данного сорта подвергались предварительной подготовке. В качестве дезинфекции посевного материала применялось замачивание семян в 3%-ном растворе перекиси водорода в течение 10 минут с последующим трехкратным промыванием проточной водой. Далее проводилась стратификация семян для синхронизации прорастания: набухшие после замачивания семена выдерживались при пониженной температуре около +4 °С в течение 12 часов. Охлаждение осуществлялось непосредственно в установке для выращивания микрозелени с использованием термоэлектрического элемента Пельтье, позволявшего поддерживать заданный температурный режим. После этапа охлаждения семена высевались в чашки Петри. Посев осуществлялся из расчёта 5 г семян на одну чашку Петри. Каждый вариант опыта был заложен в трёхкратной повторности, то есть было подготовлено три идентичных чашки с посевами (5 г семян каждая) для обеспечения статистической достоверности последующих измерений.

Питательные растворы не применялись, поскольку на ранних этапах прорастания (первые 5–7 суток) микрозелень практически не реагирует на внесение удобрений: рост проростков определяется главным образом внутренними запасами семени. Кроме того, технология производства микрозелени традиционно предусматривает выращивание без минерального питания, что соответствует как физиологическим особенностям культуры, так и требованиям рынка к продуктам, полученным без использования удобрений.

По окончании эксперимента (7-й день) определяли урожайность микрозелени редиса, для чего фиксировали основные качественные показатели: биомассу, длину вегетативной и корневой частей.

Микрозелень редиса была выбрана в качестве оптимальной модели для выращивания в условиях aeropоники, вследствие сочетания нескольких факторов. Во-первых, её быстрый и синхронный 7-дневный цикл развития позволяет оперативно оценивать стабильность поддерживаемых внутри камер условий — любые колебания температуры или влажности сразу отражаются на скорости и однородности роста проростков. Во-вторых, нежная надземная и компактная корневая система редиса не требует глубоких контейнеров и легко извлекается, что обеспечивает доступ к вегетационным камерам. В-третьих, микрозелень редиса предъявляет высокие требования к равномерности освещения и подаче ультразвукового тумана. Чувствительность микрозелени редиса ко всем ключевым параметрам микроклимата и простота её культивирования делают её идеальным биологическим индикатором для всестороннего изучения её параметров в условиях aeropоники.

Статистическая обработка данных выполнена в соответствии с общепринятой методикой дисперсионного анализа, изложенной Б.А. Доспеховым [1]. Для оценки различий между средними вычисляли наименьшую существенную разность (HCP_{05}). Расчёты проводили в программе Microsoft Excel.

Основные результаты и обсуждения

Для проведения комплексной оценки влияния спектрального состава светодиодного освещения на рост микрозелени первым и наиболее информативным показателем выступает длина проростков. Параметр длины позволяет оперативно судить о характере роста растений под воздействием различных световых режимов, отражая как общую скорость развития, так и специфические морфологические реакции на спектр. Измерение длины вегетативной и корневой частей на начальном этапе выращивания является ключевым этапом анализа, позволяющим установить основные тенденции влияния светового фактора до перехода к оценке урожайности (табл. 2).

Таблица 2 - Влияние спектрального состава освещения на морфологические показатели растений редиса в условиях aeropоники

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.67.2.2>

Вариант	Проросток (вегетативная часть)			Корневая система			Общая длина проростка		
	X_{cp}	± к контролю		X_{cp}	± к контролю		X_{cp}	± к контролю	
		мм	%		мм	%		мм	%
Полный спектр	26	-	-	49	-	-	75	-	-
Красный свет	28	2	8	59	11	22	88	13	17
HCP_{05}	-	2	-	-	3	-	-	4	-

Эксперимент показал, что при облучении только красным светом (пик 650 нм) длина как надземной части, так и корней проростков редиса была больше, чем при полном спектре (с пиками 450 и 620 нм). Такое отличие связано с тем, что синий свет существенно меняет программу фотоморфогенеза растений. По мнению ряда исследователей [5], добавление синего диапазона в освещение вызывает активацию криптохромов и фототропов, которые способны тормозить удлинение стеблей и стимулировать формирование листьев. Напротив, в условиях почти чисто красного света (с низкой долей синего) ключевые процессы фотоморфогенеза ослаблены, и побеги приобретают «этиолированный» или «теневого» облик — они сильно удлиняются. Так [7], в опытах с томатами длина стеблей растений заметно уменьшалась при росте при большем содержании синего света, тогда как монохроматический красный свет давал более длинные побеги. Аналогичные наблюдения отмечаются и для микрозелени капустных: при 100% красном спектре ростки были значительно длиннее, чем при смешанном освещении, характеризующемся значимой долей синего диапазона [3].

Морфологический эффект объясняется взаимодействием фотоприёмников и гормональных систем. Синие рецепторы (криптохромы) в условиях освещения индуцируют снижение уровня биологически активных гиббереллинов — гормонов, стимулирующих клеточный рост. Криптохромы активируют гены, разрушающие гормоны, и подавляют гены их синтеза, что ведёт к затормаживанию удлинения гипокотыля. При дефиците синего света (чисто красный свет) это угнетение гиббереллинов ослабевает: гормоны накапливаются, и клетки стебля удлиняются сильнее. Так «красный» свет сам по себе способствует удлинению побегов, в то время как «синий» свет действует как ограничитель роста [9].

Кроме того, фотосигналы меняют распределение гормона роста ауксина по растению. Свет стимулирует синтез ауксина в молодых листьях, после чего он транспортируется по растению: в надземных частях ауксин способствует расширению клеток побега, а в корнях — стимулирует их деление и удлинение. При преобладании красного спектра и усиленном росте побега часть ауксина может перемещаться в корни, дополнительно ускоряя их рост. Наличие синего света обычно обеспечивает более сбалансированное распределение гормонов и способствует компактному развитию листьев, тогда как его отсутствие смещает ростовой баланс в сторону вытягивания побегов, характерного для теневого адаптивного ответа, индуцированного светом с низкой долей синего диапазона [8].

Выращивание без удобрений (только вода) создаёт дефицит макро- и микроэлементов. При ограничении питательных ресурсов растения адаптируются, перераспределяя рост между корнями и побегом. Как показано в мета-анализе, при дефиците азота или фосфора абсолютная длина корней и побегов обычно снижается, но отношение

длины корней к массе побега (корневая/побег) возрастает. Растения стремятся нарастить более развитую корневую систему, чтобы эффективнее искать питательные вещества. В нашем эксперименте дефицит удобрений, вероятно, побуждал редис перераспределять гормональные и энергетические ресурсы в пользу корней, что могло компенсировать эффект ограниченного роста надземной части.

Под действием монохроматического красного света в сочетании с отсутствием питательных элементов формируется выраженный синергетический эффект. Ограниченная фотосинтетическая активность, обусловленная низкой долей синего спектра, накладывается на стрессовый сигнал дефицита минерального питания. В таких условиях у растений усиливаются процессы удлинённого морфогенеза: надземная часть увеличивает линейный рост как компенсаторную реакцию, направленную на увеличение светозахвата и поддержание углеродного обмена, тогда как корневая система проявляет тенденцию к расширению зоны поиска доступных элементов питания. Подобная комбинация факторов формирует типичный для стрессовых условий вытянутый фенотип проростков. Фотохимически красный свет переводит большую долю фитохрома в активную форму Pfr, создавая ситуацию, схожую с высоким RFR, которая обычно ассоциируется с ростом и удлинением побегов. При этом синего спектра недостаточно, чтобы активировать криптохромное торможение роста. В совокупности растения получают сигнал «теневого» обитания и запускают программы усиленного удлинения (сходные с теньевым ответом или световыми стрессами). Удлинённый стебель может помогать транспонировать ауксин к корням, стимулируя их рост [10].

Итак, при красном освещении без удобрений редис образует длинные «стебли» и длинные корни: мало синего света — мало блокировки удлинения, мало питательных веществ — приоритет корням, а избыток красного света воспринимается растением как сигнал необходимости разрастаться. Научные исследования подтверждают: чисто красный свет традиционно ассоциируется с удлинённым ростом растений по сравнению со сбалансированным спектром с синим компонентом. Плюс при дефиците питательных элементов наблюдается перераспределение роста в пользу корневой системы. Эти факторы вместе и объясняют увеличение длины как побегов, так и корней микрозелени редиса при красном спектре.

Увеличение длины проростков и корней под красным LED-светом объясняется тем, что в отсутствие синего компонента фотоморфогенетическое торможение роста ослабевает, а гормональные сигналы (например, повышенный уровень гиббереллинов и изменённое распределение ауксина) стимулируют удлинение. При этом дефицит питательных веществ дополнительно смещает распределение ресурсов в пользу развития корневой системы. В совокупности такие условия усиливают формирование вытянутого фенотипа проростков, что полностью согласуется с литературными данными, описывающими удлинённый тип роста растений при преобладании красного света [2].

Для получения более детальной характеристики результатов исследования, помимо сравнения средних значений, была проведена вариационная обработка данных. Применение методов вариационной статистики позволяет не только оценить центральные тенденции роста проростков, но и выявить степень их выровненности, что является важным показателем равномерности условий выращивания и стабильности воздействия исследуемых факторов. Анализ дисперсии и показателей вариации даёт возможность объективно судить о согласованности реакции растений на экспериментальные условия и качестве применённой технологии.

Использование этого подхода обосновано задачами оценки однородности роста микрозелени в рамках тестирования конструкции устройства: высокая выровненность биометрических показателей свидетельствует о равномерности микроклимата внутри вегетационной камеры, отсутствии значимых локальных колебаний условий и корректной работе оборудования. В таблице приведены основные параметры вариационной статистики, рассчитанные по результатам измерений длины проростков (табл. 3).

Таблица 3 - Вариационная обработка результатов эксперимента

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.67.2.3>

Вариант	Длина, мм	min	max	M	±	m*	V, %
Полный спектр	Вегетативная часть	12	52	26	±	2	28
	Корневая система	17	89	49	±	4	34
	Общая длина проростка	51	116	75	±	5	24
Красный свет	Вегетативная часть	18	41	28	±	1	20
	Корневая система	25	96	59	±	4	29
	Общая длина проростка	45	131	88	±	5	23

Примечание: (M) среднее ± (m) стандартная ошибка, n = 3

Для углублённой оценки влияния спектрального состава света на рост микрозелени редиса была проведена вариационная обработка результатов эксперимента (табл. 3). Этот подход позволил не только сопоставить средние значения длины проростков, но и проанализировать диапазон варьирования, стабильность роста и однородность развития растений в различных условиях освещения.

По варианту с полным спектром длина вегетативной части проростков колебалась от 12 до 52 мм, при среднем значении (M) 26 мм и коэффициенте вариации (V) 28%. Стандартная ошибка среднего (m) составила 2 мм. Длина корневой системы в этом варианте варьировала от 17 до 89 мм, при среднем 49 мм, $m = 4$ мм, $V = 34\%$. Общая длина проростка изменялась от 51 до 116 мм, $M = 75$ мм, $m = 5$ мм, $V = 24\%$.

В варианте с красным спектром диапазон длины вегетативной части составил от 18 до 41 мм, при $M = 28$ мм, $m = 1$ мм, $V = 20\%$. Корневая система имела диапазон 25–96 мм, $M = 59$ мм, $m = 4$ мм, $V = 29\%$. Общая длина проростка варьировала от 45 до 131 мм, $M = 88$ мм, $m = 5$ мм, $V = 23\%$.

Сравнительный анализ показал, что вариант с красным спектром обеспечил не только более высокие средние значения длины проростков, но и меньшую степень варибельности для вегетативной части ($V = 20\%$ против 28% в контроле) и общей длины проростка ($V = 23\%$ против 24% в контроле). При этом уровень вариации длины корневой системы был несколько ниже при красном свете ($V = 29\%$) по сравнению с полным спектром ($V = 34\%$).

Полученные данные указывают на то, что освещение красным светом способствовало не только увеличению длины проростков, но и более равномерному развитию растений в пределах экспериментальной группы. Более низкий коэффициент вариации по основным морфологическим показателям свидетельствует о высокой выровненности растений, что может отражать стабилизирующее действие красного спектра в условиях данного эксперимента. Вариационный анализ подтвердил, что красный спектр оказывает не только стимулирующее влияние на рост микрозелени редиса, но и способствует формированию более однородной популяции проростков, что важно при выращивании растений в условиях aeropоники.

В обычных условиях выращивания корневая система растений обеспечивает водный и минеральный обмен с почвой, механическую опору и накопление углеводов. Несмотря на отсутствие развитых фотосинтетических пигментов, корень реагирует на освещение за счёт световых сигналов: корневые ткани содержат функциональные фоторецепторы — фитохромы (красный/дальний красный свет), криптохромы и фототропины (синий свет) и рецептор UVR8 (УФ-В) — которые экспрессируются по всему растению, в том числе в корнях. Световые сигналы могут действовать непосредственно на корень или опосредованно через посылки от надземных органов (гормоны, сахара, мобильные белки). Так, свет в кроне стимулирует фотосинтез и синтез ауксина в листьях, после чего ауксин транспортируется к корням и регулирует их рост. Фоторецепторы корня активируют известные сигнальные пути фотоморфогенеза. Например, фитохромы, взаимодействуя с ауксином и транспортёрами PIN, изменяют направление роста корня под разным соотношением RFR (красного/дальне-красного). В экспериментах Costigan S.E. et al. [4] показано, что блокировка синтеза фитохромного хромофора только в корнях приводит к удлинению корней при освещении (белом, синем и красном), что подтверждает роль корневых фитохромов в контроле длины корня. Фототропин PHOT1 в ответ на синий свет индуцирует отрицательный фототропизм корня (изгиб от света) через несимметричное распределение ауксина: корень растёт вниз, обходя освещённые участки. При этом под действием света меняется локализация PIN-белков: например, отмечено снижение экспрессии транспортеров PIN3 и LAX3 в освещённых слоях коры, что указывает на перекрёстную связь световых и ауксиновых сигналов. Стабилизация транскрипционного фактора HY5 под синим светом в побегах и его перемещение в корень дополнительно регулируют экспрессию генов, отвечающих за деление клеток и формирование боковых корней [6].

Гормональное перераспределение ауксинов под светом ведёт к морфогенетическим изменениям корня. В условиях освещения (в сравнении с полной тьмой) у сеянцев обычно наблюдается более активный рост главного корня и обильное образование боковых корней. Так, красный свет усиливает полярный транспорт ауксина из побега в корень и стимулирует формирование боковых корней (например, у табака). Синий свет, взаимодействуя с фототропинами и COP1, изменяет асимметрию ауксина, что вызывает негативный фототропизм и способствует удлинению главного корня. Кроме того, у растений под светом может наблюдаться «озеленение» корней: свет и ауксин регулируют синтез хлорофилла в корневых клетках, причём факторы HY5 и GLK2 индуцируют экспрессию хлоропластных генов, тогда как ауксин подавляет озеленение корня. В итоге световые сигналы через ауксиновую систему модулируют фенотип корня: его длину, толщину корневого стержня, разветвлённость и образование придаточных корней и волосков. Эти морфологические параметры прямо связаны с опорной и транспортной функцией корня: например, большое число боковых корней и корневых волосков улучшает поглощение воды и минералов и укрепляет растение в почве.

Поскольку спектральный состав света в значительной мере влияет на распределение ауксинов и работу фоторецепторов, измерение морфологических характеристик корня — например, длины основного корня или числа боковых — при различных световых режимах оправдано. Такие признаки часто используются как индикаторы физиологического состояния сеянца. Так, у сеянцев, подвергаемых разным качествам освещения, хорошо коррелируют изменение длины корня и плотности боковых корней с гормональными перестройками и продуктивностью: при низком освещении развитие боковых корней резко тормозится, а при синем и красном свете отмечается более развитая корневая система. Анализ морфологии корня позволяет судить о влиянии света на гормональный баланс растения и общей его приспособленности к окружающей среде. Исследование длины главного корня и других морфометрических показателей при разных спектральных режимах действительно служит надёжным физиологическим маркером состояния проростка.

Современные исследования подчёркивают роль фоторецепторов и их взаимодействие с ауксином в регуляции развития корня. Распределение ауксина изменяется под действием света, что приводит к фототропным и

гравитотропным реакциям корня. Установлено, что световое воздействие на побег (фотопериод, интенсивность, спектр) индуцирует синтез сигналов (ауксин, сахара), которые модулируют ростовые процессы корня. В совокупности эти механизмы объясняют, почему изменение спектрального состава освещения приводит к заметным морфологическим перестройкам в корневой системе, и подтверждают, что изучение морфологии корня при различных световых режимах является обоснованным подходом.

Результаты учёта количества корешков на проростках редиса, представлены в таблице 4.

Таблица 4 - Влияние спектрального состава освещения на количество корешков на проростке микрозелени редиса на момент уборки

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.67.2.4>

Вариант	Количество корешков на проростке, шт	± к контролю	
		шт	%
Полный спектр	1,86	-	-
Красный свет	3,23	1,38	74
<i>HCP₀₅</i>		0,42	

Опыт показывает значительное влияние спектрального состава освещения на морфогенез корневой системы. В варианте с полным спектром среднее количество корешков составило 1,86 шт. на проросток. При освещении красным светом этот показатель увеличился до 3,23 шт., что на 1,38 единицы (или на 74%) превышает значение контроля.

Сравнение полученных данных с величиной наименьшей существенной разницы ($HCP_{05} = 0,42$) свидетельствует о статистически достоверной разнице между вариантами на уровне значимости 5%, поскольку прирост по сравнению с контролем (1,38 единицы) значительно превышает критическое значение.

Применение монохроматического красного света способствовало усиленному формированию корневых боковых органов, что проявилось в достоверно большем числе корешков на проростке по сравнению с освещением полным спектром. Данный эффект может быть объяснён изменением гормонального баланса под влиянием красного света, в частности усилением транспорта и аккумуляции ауксина в зоне корневых меристем. Как известно, красный свет активизирует фитохром-рецепторы, что может стимулировать формирование боковых корней через регуляцию экспрессии генов, участвующих в их инициации.

Увеличение числа корешков при красном свете также может быть связано с «теневым ответом» растений, при котором в условиях пониженного содержания синего света происходит перераспределение ресурсов в пользу разветвления корневой системы, что обеспечивает растениям адаптивное преимущество в условиях ограниченного светового сигнала. Увеличение количества корешков при красном свете является не только статистически достоверным, но и биологически значимым результатом, указывающим на возможность регулирования морфогенеза корневой системы спектром освещения.

В ходе проведённого исследования установлено влияние спектрального состава освещения на рост и развитие микрозелени редиса в условиях аэропонной установки. Реализация запланированных задач позволила получить комплексную оценку морфометрических показателей растений при двух вариантах освещения.

Заключение

Проведённые исследования показали, что спектральный состав светодиодного освещения существенно влияет на морфогенез микрозелени редиса при выращивании в условиях аэропоники. Монохроматический красный свет ($\lambda \approx 650$ нм) обеспечивал более интенсивное удлинение проростков по сравнению с полным спектром, содержащим синюю компоненту. Средняя длина вегетативной части увеличивалась с 26 мм при полном спектре до 28 мм при красном свете, а средняя длина корневой системы — с 49 до 59 мм. Общая длина проростка возрастала с 75 до 88 мм, что указывает на усиленное развитие как надземной, так и корневой частей растения.

Анализ диапазона варьирования длины проростков подтвердил выраженность реакций на спектральный фактор. При полном спектре длина надземной части изменялась от 12 до 52 мм, корней — от 17 до 89 мм, общая длина — от 51 до 116 мм. При красном освещении эти значения достигали 18–41 мм, 25–96 мм и 45–131 мм соответственно. Отмечено также снижение коэффициента вариации длины вегетативной части с 28% до 20% и общей длины проростков с 24% до 23%, что свидетельствует о большей однородности роста под красным спектром.

Полученные данные подтверждают, что исключение синей компоненты света приводит к формированию вытянутого морфотипа проростков и стимулирует развитие корневой системы. Такие различия соответствуют известным физиологическим механизмам, включающим снижение криптохром-зависимого торможения удлинения и формирование реакции, характерной для теневого типа развития в условиях освещения с низкой долей синего диапазона.

Установлены количественные различия в росте микрозелени редиса при варьировании спектрального состава света, выявлены особенности формирования вегетативной и корневой частей проростков, а также дана оценка степени вариабельности морфометрических показателей. Результаты могут быть использованы для оптимизации световых режимов при выращивании микрозелени методом гидро- и аэропоники и в дальнейшем изучении влияния узких спектральных диапазонов на раннее развитие культур семейства Brassicaceae.



Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта / Б.А. Доспехов. — Москва: Агропромиздат, 1985. — 351 с.
2. Bottiglione B. Blue and Red LED Lights Differently Affect Growth Responses and Biochemical Parameters in Lentil (*Lens culinaris*) / B. Bottiglione, A. Villani, L. Mastropasqua [et al.] // *Biology*. — 2024. — № 13. — P. 12. — DOI: 10.3390/biology13010012.
3. Brazaitytė A. Effect of different ratios of blue and red led light on brassicaceae microgreens under a controlled environment / A. Brazaitytė [et al.] // *Plants*. — 2021. — Vol. 10. — № 4. — P. 801.
4. Costigan S.E. Root-Localized Phytochrome Chromophore Synthesis Is Necessary for Normal Root Growth and Shoot-to-Root Signaling / S.E. Costigan, G. Sarnighausen, D. Lang [et al.] // *Plant Physiology*. — 2011. — Vol. 156. — № 3. — P. 1229–1241. — DOI: 10.1104/pp.110.173158.
5. Folta K.M. Unexpected roles for cryptochrome 2 and phototropin revealed by high-resolution analysis of blue light-mediated hypocotyl growth inhibition / K.M. Folta, E.P. Spalding // *The Plant Journal*. — 2001. — Vol. 26. — № 5. — P. 471–478.
6. Lin C. Blue light receptors and signal transduction / C. Lin // *The Plant Cell*. — 2002. — Vol. 14. — №. Suppl_1. — P. S207–S225.
7. Naznin M.T. Effect of different combinations of red and blue LED light on growth characteristics and pigment content of in vitro tomato plantlets / M.T. Naznin [et al.] // *Agriculture*. — 2019. — Vol. 9. — № 9. — P. 196.
8. Sassi M. Shedding light on auxin movement: light-regulation of polar auxin transport in the photocontrol of plant development / M. Sassi [et al.] // *Plant signaling & behavior*. — 2013. — Vol. 8. — № 3. — P. e23355
9. Zhao X. A study of gibberellin homeostasis and cryptochrome-mediated blue light inhibition of hypocotyl elongation / X. Zhao [et al.] // *Plant Physiology*. — 2007. — Vol. 145. — № 1. — P. 106–118.
10. Zhang T. Effects of different LED sources on the growth and nitrogen metabolism of lettuce / T. Zhang [et al.] // *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*. — 2018. — Vol. 134. — № 2. — P. 231–240.
11. Vetchinnikov A.A. Influence of the radiation intensity of LED light sources of the red-blue spectrum on the yield and energy consumption of microgreens / A.A. Vetchinnikov, D.A. Filatov, S.I. Olonina [et al.] // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. — 2021. — Vol. 723. — № 3. — P. 032046.
12. Filatov D.A. Intermittent LED lighting helps reduce energy costs when growing microgreens on vertical controlled environment farms / D.A. Filatov, A.A. Vetchinnikov, S.I. Olonina [et al.] // *Improving Energy Efficiency, Environmental Safety and Sustainable Development in Agriculture. International Scientific and Practical Conference*. — London, 2022. — P. 01296.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Dospikhov B.A. Metodika polevogo opita [Field experiment methodology] / B.A. Dospikhov. — Moscow: Agropromizdat, 1985. — 351 p. [in Russian]
2. Bottiglione B. Blue and Red LED Lights Differently Affect Growth Responses and Biochemical Parameters in Lentil (*Lens culinaris*) / B. Bottiglione, A. Villani, L. Mastropasqua [et al.] // *Biology*. — 2024. — № 13. — P. 12. — DOI: 10.3390/biology13010012.
3. Brazaitytė A. Effect of different ratios of blue and red led light on brassicaceae microgreens under a controlled environment / A. Brazaitytė [et al.] // *Plants*. — 2021. — Vol. 10. — № 4. — P. 801.
4. Costigan S.E. Root-Localized Phytochrome Chromophore Synthesis Is Necessary for Normal Root Growth and Shoot-to-Root Signaling / S.E. Costigan, G. Sarnighausen, D. Lang [et al.] // *Plant Physiology*. — 2011. — Vol. 156. — № 3. — P. 1229–1241. — DOI: 10.1104/pp.110.173158.
5. Folta K.M. Unexpected roles for cryptochrome 2 and phototropin revealed by high-resolution analysis of blue light-mediated hypocotyl growth inhibition / K.M. Folta, E.P. Spalding // *The Plant Journal*. — 2001. — Vol. 26. — № 5. — P. 471–478.
6. Lin C. Blue light receptors and signal transduction / C. Lin // *The Plant Cell*. — 2002. — Vol. 14. — №. Suppl_1. — P. S207–S225.
7. Naznin M.T. Effect of different combinations of red and blue LED light on growth characteristics and pigment content of in vitro tomato plantlets / M.T. Naznin [et al.] // *Agriculture*. — 2019. — Vol. 9. — № 9. — P. 196.
8. Sassi M. Shedding light on auxin movement: light-regulation of polar auxin transport in the photocontrol of plant development / M. Sassi [et al.] // *Plant signaling & behavior*. — 2013. — Vol. 8. — № 3. — P. e23355
9. Zhao X. A study of gibberellin homeostasis and cryptochrome-mediated blue light inhibition of hypocotyl elongation / X. Zhao [et al.] // *Plant Physiology*. — 2007. — Vol. 145. — № 1. — P. 106–118.
10. Zhang T. Effects of different LED sources on the growth and nitrogen metabolism of lettuce / T. Zhang [et al.] // *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*. — 2018. — Vol. 134. — № 2. — P. 231–240.



11. Vetchinnikov A.A. Influence of the radiation intensity of LED light sources of the red-blue spectrum on the yield and energy consumption of microgreens / A.A. Vetchinnikov, D.A. Filatov, S.I. Olonina [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2021. — Vol. 723. — № 3. — P. 032046.

12. Filatov D.A. Intermittent LED lighting helps reduce energy costs when growing microgreens on vertical controlled environment farms / D.A. Filatov, A.A. Vetchinnikov, S.I. Olonina [et al.] // Improving Energy Efficiency, Environmental Safety and Sustainable Development in Agriculture. International Scientific and Practical Conference. — London, 2022. — P. 01296.