

АГРОХИМИЯ И АГРОПОЧВОВЕДЕНИЕ

AGROCHEMISTRY
AND AGRICULTURAL SOIL SCIENCE

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-4-1210

EDN: GXURZQ

УДК 631.589:631.172



Научная статья

ВЛИЯНИЕ СПЕКТРА СВЕТА
НА РОСТ *LACTUCA SATIVA* В КОНТРОЛИРУЕМЫХ
УСЛОВИЯХ: НОВЫЕ ПОДХОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ
ДЛЯ ГИДРОПОННЫХ СИСТЕМ

С.В. Абрамова, Е.Н. Бояров, Н.Ф. Двойнова, О.В. Купцова

Аннотация

Обоснование. В условиях современных вызовов по обеспечению продовольственной безопасности и устойчивого развития агротехнологий в Российской Федерации особое внимание уделяется оптимизации методов выращивания растений в контролируемых средах. Одним из перспективных методов выращивания растений является использование закрытых гидропонных систем, в которых световой спектр играет ключевую роль для регуляции ростовых процессов и фотосинтеза. Данная статья посвящена исследованию влияния различных спектров света (синие, красные и смешанные) на рост растения *Lactuca sativa* в контролируемых условиях гидропоники. В работе представлены результаты сравнительного анализа скорости роста, биомассы и качества растений, а

Цель. Изучение влияния различных спектров света (синего, красного и смешанного) на рост и продуктивность салатных культур (*Lactuca sativa*) в условиях гидропоники для определения оптимальных световых условий, обеспечивающих максимальную урожайность и качество продукции.

Материалы и методы: Эксперимент проводился в лаборатории экспериментального гидропонного выращивания с использованием автоматизированной установки. В исследовании применялись LED-лампы с заданными спектральными характеристиками, которые объединялись с группы для создания различных

световых условий. Основные параметры, такие как длина стебля, количество листьев, биомасса растений и содержание хлорофилла, измерялись при использовании монохроматического синего, красного света и их комбинации.

Результаты: Исследование показало, что синий свет (450 нм) увеличивает содержание хлорофилла и фотосинтетическую активность, способствуя компактному росту растений с большим количеством листьев, но снижает общую биомассу. Красный свет (660 нм, 740 нм), напротив, стимулирует увеличение длины стебля и биомассы, но снижает содержание хлорофилла. Комбинированный свет (красный и синий спектры) продемонстрировал сбалансированные результаты, обеспечивая оптимальные условия для роста, высокой фотосинтетической активности и качественной биомассы растений.

Заключение. Применение комбинированного спектра света в гидропонных установках позволяет достичь максимальных показателей продуктивности и качества продукции салатных культур. Полученные результаты подчеркивают необходимость дальнейшей оптимизации световых условий для достижения эффективного роста *Lactuca sativa* в условиях гидропоники и подтверждают перспективность закрытых гидропонных систем для устойчивого производства продовольственных культур.

Ключевые слова: гидропоника; спектр света; фотосинтез; *Lactuca sativa*; LED-фитотампа; управляемая среда

Для цитирования. Абрамова, С. В., Бояров, Е. Н., Двойнова, Н. Ф., & Купцова, О. В. (2025). Влияние спектра света на рост *Lactuca sativa* в контролируемых условиях: новые подходы и перспективы для гидропонных систем. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(4), 269-295. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1210>

Original article

THE EFFECT OF THE LIGHT SPECTRUM ON THE GROWTH OF *LACTUCA SATIVA* UNDER CONTROLLED CONDITIONS: NEW APPROACHES AND PROSPECTS FOR HYDROPONIC SYSTEMS

S.V. Abramova, E.N. Boyarov, N.F. Dvoinova, O.V. Kuptsova

Abstract

Background. In the context of modern challenges for ensuring food security and sustainable development of agrotechnologies in the Russian Federation, par-

ticular attention is being paid to optimizing plant cultivation methods in controlled environments. One of the promising methods is the use of closed hydroponic systems, where the light spectrum plays a key role in regulating growth processes and photosynthesis. This article focuses on studying the effects of different light spectra (blue, red, and mixed) on the growth of *Lactuca sativa* under controlled hydroponic conditions. The study presents the results of a comparative analysis of growth rates, biomass, and plant quality.

Purpose. To examine the influence of different light spectra (blue, red, and mixed) on the growth and productivity of lettuce (*Lactuca sativa*) in hydroponic conditions, to determine the optimal lighting conditions for maximizing yield and quality.

Materials and Methods. The study found that blue light (450 nm) increases chlorophyll content and photosynthetic activity, promoting compact plant growth with a high leaf count but reducing total biomass. Red light (660 nm, 740 nm), on the other hand, stimulates stem elongation and biomass accumulation but decreases chlorophyll content. Combined lighting (red and blue spectra) provided balanced results, ensuring optimal conditions for growth, high photosynthetic activity, and high-quality plant biomass.

Results. It has been shown that the use of UAVs in agriculture in the Sakhalin region offers broad opportunities for monitoring agricultural indicators, enabling the creation of a compact and flexible data collection system through the connection and integration of various sensors, thus facilitating the development of a scalable system. A model for the application of UAVs in the ecological monitoring of agricultural lands in the Sakhalin region has been developed, featuring an original interface for real-time sensor data processing and storage in a specialized database. To implement the model, a methodology for utilizing UAVs to assess the quality state of agricultural lands in the Sakhalin region was developed and tested.

Conclusions. The use of combined light spectra in hydroponic systems allows for achieving maximum productivity and quality in lettuce cultivation. The results underscore the need for further optimization of lighting conditions to promote efficient *Lactuca sativa* growth under hydroponic conditions and confirm the potential of closed hydroponic systems for sustainable food crop production.

Keywords: hydroponics; light spectrum; photosynthesis; *Lactuca sativa*; LED grow light; controlled environment

For citation. Abramova, S. V., Boyarov, E. N., Dvoynova, N. F., & Kuptsova, O. V. (2025). The impact of light spectrum on *Lactuca sativa* growth in controlled conditions: New approaches and prospects for hydroponic systems. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(4), 269-295. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1210>

Введение

В условиях усиленного импортозамещения продукции сельского хозяйства в России, климатических особенностей рискованного земледелия в ряде ее регионов приобретают актуальность методы выращивания салатных культур в гидропонных системах, обеспечивающих население свежей, качественной и безопасной продукцией. Не мало важным для сельхозпроизводителей остается вопрос снижения энергоемкости применяемых технологий выращивания продукции. Внедрение в технологию контроля световой среды позволяет при получении высококачественного урожая снизить затраты на электричество до 40 %, закупку пестицидов до 40 %, экономия воды достигает 30 %, а срок выращивания продукции сокращается на 20 %.

Вместе с тем, в XXI веке возникают проблемы с устойчивостью сельскохозяйственной деятельности, в том числе, из-за роста затрат на энергию, рабочую силу и материалы [4]. Выращивание растений в условиях закрытого грунта применяется уже довольно давно, но, как отмечают ученые, несмотря на то, что такой способ может значительно повысить эффективность использования ресурсов (поверхности, воды и питательных веществ) по сравнению с традиционными системами выращивания, но затраты на освещение по-прежнему высоки [19].

Гидропоника, как метод выращивания растений, представляет собой систему культивации без почвы, где корни растений находятся в постоянном контакте с питательным раствором. Одним из основных преимуществ этой технологии является возможность полного контроля над внешними факторами, включая свет, температуру, влажность и концентрацию углекислого газа. Среди всех этих факторов именно свет оказывает наиболее существенное влияние на физиологические процессы растений, такие как фотосинтез, транспирация и метаболизм.

Фотосинтетически активная радиация (PAR) включает длины волн от 400 до 700 нм, и каждая из них по-разному влияет на процессы роста растений. Синий свет (450-470 нм) традиционно ассоциируется с увеличением содержания хлорофилла и ускорением фотосинтетических процессов, что приводит к компактному росту растений. Красный свет (620-660 нм) стимулирует удлинение стебля и образование листьев, что способствует увеличению общей биомассы растений [2].

Исследования по влиянию спектра света на рост салата в гидропонных системах демонстрируют значительное воздействие светодиодных технологий на ростовые характеристики, биохимический состав и качество про-

дукции. Вопрос оптимизации световых условий остаётся центральным для достижения высокой урожайности и качества салата (*Lactuca sativa*).

Интенсивность и качество освещения являются одними из наиболее важных факторов окружающей среды для физиологии и биохимии сельскохозяйственных культур [22]. Интенсивность света контролирует основные процессы в растениях, включая прорастание, разрастание листьев, фотосинтез, зарождение почек и цветков, а также деление клеток. При этом, оптимальная интенсивность света способствует быстрому ускорению процессов в растениях [6]. Кроме того, замечено, что ультрафиолетовое излучение (UV-B) вызывает защитную реакцию у растений и может снизить восприимчивость к болезням [15].

Современные зарубежные исследования (в основном, проведенные китайскими учеными) показывают, что наиболее эффективное сочетание спектров света для выращивания салата – это комбинация красного и синего света. Это связано с тем, что красный свет (620–660 нм) стимулирует удлинение стебля и активизирует деление клеток, что способствует увеличению биомассы растения. Синий свет (450–470 нм), напротив, повышает содержание хлорофилла и фотосинтетическую активность, что улучшает качество листьев. Также было показано, что координация гидравлической проводимости и активности устьиц под воздействием различных световых качеств способствовала улучшению фотосинтеза у огурцов, что может быть аналогично и для салата [10]. Другие исследования показали, что комбинированное использование красного и синего спектра не только увеличивает фотосинтетическую активность, но и приводит к улучшению морфологии салата, особенно в условиях закрытых систем выращивания [11]. Исследования воздействия комбинации спектров показывают, что использование светодиодных ламп для освещения салата в теплицах и других закрытых системах способствует улучшению качества продукции, что также поддерживается рядом других экспериментов [18]. Однако добавление зелёного света в спектр, может улучшить общее освещение и сделать возможным проникновение света в нижние слои листьев, что, в свою очередь, улучшает рост и качество биомассы салата [23]. Это подтверждается также результатами исследований [10], которые показали, что баланс между красным, синим и зелёным светом способствует накоплению полезных веществ, таких как фенолы и растворимые сахара, в листьях салата.

Российские исследователи также активно работают в области оптимизации светодиодного освещения для гидропонных систем. Так, в исследованиях [1] было показано, что оптимизация спектра света позволяет

увеличить урожайность и улучшить качество листовой массы салата в условиях контролируемой среды. Ученые отметили, что использование красно-синего спектра приводит к увеличению фотосинтетической активности, особенно на поздних стадиях роста растений [1]. Кроме того, интересным является исследование [3], в котором было обнаружено, что синий свет влияет на активность устьиц, что позволяет улучшить транспирацию и увеличить количество листьев, что подтверждает общие выводы о важности синего спектра для роста салата.

Изучение обмена веществ у растений также показало, что различные световые спектры могут существенно влиять на азотный обмен. Исследования [14], показали, что красный свет увеличивает активность нитратредуктазы, что способствует лучшему усвоению азота и снижению накопления нитратов в листьях. Это особенно важно для обеспечения экологичности продукции, так как высокие уровни нитратов могут быть вредны для здоровья.

Сложность управления спектром света и его влияния на разные сорта салата также отмечена в исследовании [13], где авторы обнаружили, что красные сорта лучше реагируют на белый свет, тогда как зеленые сорта лучше развиваются при красно-синем освещении. Похожие исследования были проведены в 2018 году, где группа ученых были сосредоточены на изучении эффектов различных соотношений красного и синего света при фотопериоде от 12 до 18 часов на рост и химический состав салата сорта «Fire Red». Было установлено, что растения, освещаемые синим светом, достигли наибольшей высоты, но при этом имели наименьшее количество листьев. Комбинация красного и синего света оказалась оптимальной для повышения содержания антоцианов и свежей массы растений, что особенно важно для коммерческой привлекательности сорта [16]. Кроме того, в 2024 году отдельными научными коллективами изучено воздействие различных сочетаний синего и янтарного света на продуктивность томатов и салата. Наибольшая биомасса была получена при обработке с комбинацией «royal blue + broad amber». При переходе от синего света 430 нм к 455 нм наблюдалось значительное снижение свежей массы томатов и небольшое снижение биомассы салата, что подтверждает необходимость точного подбора длин волн для оптимизации роста в зависимости от вида растения [21]. Вместе с тем, в работе [8] исследовали влияние светодиодного освещения с использованием технологии «Internet of Things» (IoT) для контроля условий среды на морфологические параметры салата. При добавлении жёлтого спектра был выявлен рост высоты растений, что говорит о возможности адаптации световых спектров для управления

морфологией в условиях закрытого выращивания. Использование IoT позволяет более точно отслеживать влияние светового спектра в реальном времени. Также, при оценке влияния спектра света на физиологические параметры и антиоксидантную активность салата при гидропонном выращивании показали следующие результаты: сочетание синего (435 нм) и красного света (663 нм) на высокой интенсивности света увеличивало скорость фотосинтеза и урожай, тогда как более низкая интенсивность повышала антиоксидантную активность. Эти результаты подчеркивают, что интенсивность и соотношение света могут управлять как продуктивностью, так и биохимическими характеристиками растения [9]. Изучение влияния различных спектров LED-света на прорастание и рост рассады салата в условиях низкой интенсивности показали, что синий свет ускоряет прорастание и увеличивает количество всходов, особенно у зелёных сортов, а также улучшает морфологию рассады. После пересадки рассада, выращенная под синим и смешанным светом, демонстрировала лучшую производительность, что указывает на долгосрочные эффекты оптимизации спектра света [7]. Изучение влияния температуры и спектра света на рост, морфологию и содержание минералов у салата и капусты Пак-чой показывает, что повышение температуры приводило к увеличению биомассы и размера листьев, но снижало минеральное содержание, в то время как спектр света имел менее выраженное влияние. Эти данные свидетельствуют о важности учета температуры наряду с подбором спектра света для регулирования качества продукции [12].

Анализ роста и урожайности салата сорта «Fire Red» под влиянием монохромного красного и синего света в условиях контролируемой среды показывают, что красный свет оказался менее эффективным для роста растений, тогда как синий свет способствовал наибольшей высоте и свежей массе. Комбинированное освещение в соотношении «красный:синий» 2:1 или 1:2 обеспечивало более компактное строение растения и увеличивало насыщенность красного пигмента, что имеет значение для товарной привлекательности [17].

Интерес представляет и исследования, в которых сравниваются три источника искусственного света – флуоресцентная лампа и два типа светодиодов – в условиях закрытых систем выращивания. Так, светодиодная (LED) лампа приводила к меньшей длине междоузлий и большей длине корней у салата, что свидетельствует о возможности использования такого освещения для контроля структуры растений. Флуоресцентное освещение также способствовало более высокому содержанию калия, кальция и магния в растениях, что может быть полезно для контроля их питательной ценности [5].

Несмотря на уже проведенные исследования, вопрос о комбинированном использовании различных спектров для достижения максимальных морфометрических показателей и формирования адаптационных реакций, выращиваемых растений остается недостаточно изученным.

Целью данной работы является исследование влияния синих, красных и смешанных световых спектров на рост салата в гидропонных системах, а также определение оптимальных световых условий для максимальной урожайности.

Материалы и методы

Исследование проводилось в лаборатории экспериментального гидропонного выращивания растений совместно с научно-исследовательской лабораторией прикладной экологии на базе ФГБОУ ВО СахГУ с использованием автоматизированной закрытой гидропонной установки для проведения практических научных исследований в области экологического растениеводства (производство CEM Corporation, Honkomagome, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan). Установка трёхъярусная – 3 культивационных водных бака с посевными досками и освещением, наружным размером 1830 (W) x620(D)x1800(H) (рис. 1). Данная установка обеспечивает автоматический контроль освещения, концентрации удобрений, температуры, уровня, pH воды, влажности воздуха.

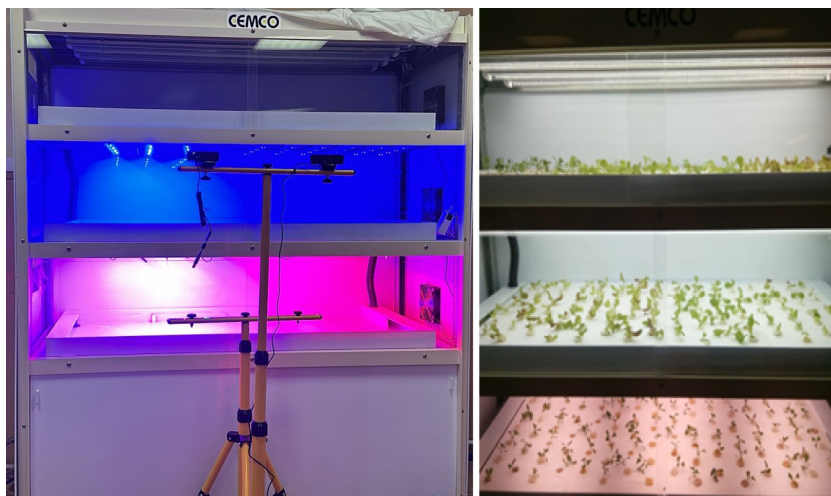


Рис. 1. Гидропонная установка «Cemco»

В работе использовали витаминный листовой салат (*Lactuca sativa*) изготовителя ООО «Агрофирма Аэлита», Россия. Гидропонный органический питательный раствор изготовлен на основе минерального удобрения Plagron Hydro, с компонентами А+В, содержащий все необходимое рассаде в легкодоступной форме. Состав компонента А: NPK (5-0-2) – 5% общего азота (N), из которых 5% нитратного азота (N_3); 2% водорастворимого оксида калия (K_2O). Компонент В: NPK (2-5-9) – 2% общего азота (N), из которых 1,9% азота нитратов (NO_3); 4% водорастворимый фосфорный ангидрид (P_2O_5); 9% водорастворимый оксид калия (K_2O). Субстрат – гидропонный поролон, установленный в посевные пенопластовые доски общим количеством 416 отверстий.

Уровень освещенности контролировали интегральным измерителем освещенности и фотопериода со встроенным датчиком, памятью и дисплеем, модель DLI-600, Apogee. Уровень хлорофилла в листьях *Lactuca sativa* измеряли портативным прибором atLEAF CHL PLUS, FT Green LLC, предназначенным для неинвазивного измерения относительного уровня содержания хлорофилла в листьях растений.



Рис. 2. Корнеобразование исследуемого растения *Lactuca sativa*

В качестве специализированных источников искусственного освещения были выбраны светодиодные фитолампы (LED) с возможностью плавной регулировки яркости со следующими длинами волн: 450 нм (синий свет), 660 нм и 740 нм (красный свет).

Сушильный шкаф WKS-1 использовали для измерения биомассы исследуемых растений под воздействием принудительной циркуляции воздуха. Растения высушивались до постоянной массы при температуре 60°C в течение 72 часов для точного измерения сухой биомассы. Для измерения

длины стебля применяли цифровой штангенциркуль, измерения биомассы – электронные лабораторные весы Digital scale Professiona.

Для проведения эксперимента были созданы стандартные условия контролируемой среды, которые имитируют оптимальные параметры для выращивания *Lactuca sativa* в гидропонных установках. Система гидропоники обеспечивала постоянное поступление питательных веществ к корням растений, а также поддерживали стабильный микроклимат на протяжении всего эксперимента (рис. 2).

1. Условия эксперимента

Эксперимент проводился в закрытой гидропонной установке с полным контролем над основными параметрами окружающей среды:

1) температура воздуха поддерживалась на уровне 21°C в дневное время и 18°C в ночное время, что соответствует оптимальной температуре для роста *Lactuca sativa*;

2) относительная влажность воздуха была стабильно на уровне 70 – 75 %, что предотвращало чрезмерную транспирацию и обеспечивало оптимальные условия для фотосинтеза;

3) световой режим был установлен на 16 часов света и 8 часов темноты, имитируя стандартный дневной цикл, который благоприятен для фотосинтеза и роста *Lactuca sativa*;

4) концентрация углекислого газа (CO) поддерживалась на уровне 400 ppm, что является стандартной концентрацией для фотосинтетической активности растений;

5) гидропонная установка использовала рециркуляцию питательного раствора, что позволило поддерживать постоянную концентрацию питательных веществ.

Общая продолжительность эксперимента составила 38 дней. Из лотков для исследования было отобрано по 30 растений *Lactuca sativa*.

2. Экспериментальные группы

Для изучения влияния светового спектра на рост *Lactuca sativa* растения были разделены на следующие группы – три экспериментальные и одна контрольная в зависимости от типа применяемого освещения. Все растения были одинакового возраста на момент начала эксперимента и высаживались в идентичные гидропонные ячейки. Далее растения подвергались экспериментальному воздействию:

группа 1: B-S (синий свет) - в этой группе растения подвергались воздействию монохроматического синего света с длиной волны 450-470 нм.

Этот спектр света известен своей способностью стимулировать фотосинтез, но при этом замедлять вертикальный рост растения. Вся световая нагрузка в этой группе поддерживалась на уровне 20 мкмоль/м²/с;

группа 2: R-S (красный свет) - растения в этой группе освещались монохроматическим красным светом с длиной волны 620–660 нм. Красный свет оказывает стимулирующее воздействие на клеточное деление и рост стебля, что предположительно приводит к удлинению растений. Световой поток также поддерживался на уровне 20 мкмоль/м²/с;

группа 3: B+R_S (комбинация синего и красного света) - в этой группе растения освещались смесью синего и красного света в соотношении 1:1. Длина волны синего света составляла 450–470 нм, а красного – 620–660 нм. Это сочетание спектров позволяет одновременно стимулировать как фотосинтез, так и рост растения. Интенсивность освещения также составляла 20 мкмоль/м²/с;

группа 4: KG - данная группа растений являлась контрольной и находилась под воздействием белого спектра света в диапазоне длин волн от 400 до 700 нм с интенсивностью светового потока 20 мкмоль/м²/с. Белый спектр позволяет имитировать дневной свет и сбалансировать рост, развитие растений.

3. Контрольные параметры и измерения

Для оценки влияния различных спектров света на рост *Lactuca sativa* были выбраны следующие параметры, которые измерялись на разных стадиях эксперимента (1, 2, 3 и 4 недели после посадки):

1) длина стебля: измерение длины стебля осуществлялось с использованием цифрового штангенциркуля с точностью до 0,1 мм. Это позволило отслеживать динамику роста растений в каждой из групп;

2) количество листьев: листья растений подсчитывались еженедельно, что позволяло определить влияние светового спектра на процесс листообразования;

3) общая биомасса: в конце эксперимента растения каждой группы были извлечены из гидропонной установки и взвешены. Оценивалась как общая сырая и сухая биомасса растений, а также отдельно листовая и корневая части растения;

4) содержание хлорофилла: для оценки фотосинтетической активности было измерено содержание хлорофилла в листьях каждого растения на длине волны 663 нм для хлорофилла «а» и 645 нм для хлорофилла «b». Измерения проводились каждые две недели;

5) измерение скорости фотосинтетической активности позволило регистрировать изменения интенсивности фотосинтеза в зависимости от спектра света.

4. Статистический анализ

Все данные, полученные в ходе эксперимента, подверглись статистической обработке. Для оценки значимости различий между экспериментальными группами использовался дисперсионный анализ (ANOVA). В случаях выявления статистически значимых различий между группами использовался тест Тьюки для выявления парных различий. Статистически значимым считалось значение уровня $p < 0,05$.

5. Ограничения исследования

Основным ограничением данного исследования является использование только двух монохроматических спектров (синего, красного и их комбинации). Другие спектры света, такие как зеленый и желтый, также могут оказывать значительное влияние на рост растений и требуют дальнейшего изучения. Также эксперимент проводился в условиях лаборатории, что ограничивает возможность его полной экстраполяции на промышленные масштабы.

Результаты

Результаты проведенного эксперимента продемонстрировали значительное влияние различных спектров света (синий, красный и их комбинация) на морфометрические показатели выращивания *Lactuca sativa* в условиях гидропонной системы. Были проанализированы пять ключевых параметров: длина стебля, количество листьев, биомасса растений, содержание хлорофилла и фотосинтетическая активность.

1. Длина стебля

Длина стебля является важным показателем морфологии растений, так как она отражает активность клеточного деления и растяжения клеток, которые находятся под влиянием освещения:

группа 1 (B-S): растения, подвергшиеся воздействию синего света, показали наименьшую длину стебля по сравнению с другими группами. Средняя длина стебля составила 8,5 см через 30 дней эксперимента. Это связано с тем, что синий свет стимулирует компактный и более «кустистый» рост растения за счет увеличения фотосинтетической активности и синтеза хлорофилла, но при этом тормозит удлинение стеблей. Эти растения были более приземистыми, с плотно расположенными листьями;

группа 2 (R-S): в этой группе наблюдалось значительное увеличение длины стебля. Средняя длина стебля составила 15,2 см, что почти вдвое больше, чем в группе с синим светом. Красный свет, благодаря его влиянию на гормональные процессы, такие как синтез ауксинов, стимулиро-

вал удлинение клеток, что привело к более вытянутым и высокорослым растениям;

группа 3 (B+R_S): растения, освещаемые комбинированным спектром, показали средние результаты – длина стебля составила 11,8 см. Этот показатель был промежуточным между результатами, полученными в группах с монохроматическими спектрами. Это указывает на сбалансированное влияние смешанного света на рост растений, при котором сохраняется умеренный рост стебля без его чрезмерного удлинения;

группа 4 (KG): длина стебля растения контрольной группы составила в среднем 10.89 см, что ниже длины групп R-S и B+R_S, но выше, чем у растения B-S. Данные результаты подтверждают, что применение монохромного света влияет значительно на формирование длины стебля исследуемого растения.

2. Количество листьев

Количество листьев является показателем уровня активности роста растений и важным параметром для оценки их продуктивности:

группа 1 (B-S): Среднее количество листьев на растение в этой группе составило 9, что является наибольшим показателем среди всех групп. Это связано с тем, что синий свет стимулирует формирование и развитие листьев, способствуя их плотному и равномерному расположению. Эти растения характеризовались более высоким уровнем фотосинтеза за счёт большего количества листьев и более активного синтеза хлорофилла;

группа 2 (R-S): Количество листьев в группе с красным светом было меньше и составило в среднем 7 на одно растение. Это связано с тем, что красный свет больше фокусируется на стимулировании роста стебля, чем на активном развитии листьев. Хотя растения и демонстрировали высокий уровень роста в длину, листьев на них было меньше;

группа 3 (B+R_S): Растения в этой группе показали средние результаты – в среднем 8 листьев на одно растение. Это указывает на более сбалансированное развитие растений, когда смешанный свет обеспечивает оптимальные условия как для роста стебля, так и для листообразования;

группа 4 (KG): количество листьев в розетке растений контрольной группы также достигло 8 листьев, подтверждая положительное влияние белого света на оптимальную урожайность листьев.

3. Биомасса

Общая биомасса растений является интегральным показателем их роста и развития, включающим как надземную часть, так и корневую систему:

группа 1 (B-S): растения в группе с синим светом продемонстрировали самую низкую сырую (95.8 г) и сухую (3.81 г) биомассу на одно растение. Сырая биомасса листовой части растения составила в среднем 46.12 г, что составило 48.14% от общей сырой биомассы. Сырая биомасса корневой части – 49.68 г. Таким образом, синий свет способствуя увеличению содержания хлорофилла и фотосинтетической активности, приводит к уменьшению общей сырой и сухой биомассы из-за замедленного роста стебля и листьев, при этом корневая система при данных условиях развивалась значительно;

группа 2 (R-S): красный свет способствовал наибольшей сырой биомассе – в среднем 120.40 г и сухой биомассе – 4.45 г на одно растение. Соотношение листьев к общей сырой массе составило 65.48%, при этом значительно сократилась сырая биомасса корневой части. Это объясняется значительным удлинением стебля и более активным ростом тканей, что привело к увеличению массы растений. Однако качество биомассы (по содержанию хлорофилла) было ниже, чем в других группах;

группа 3 (B+R_S): биомасса растений в этой группе составила в среднем 110.10 г на растение. Хотя она была ниже, чем в группе с красным светом, в смешанной группе наблюдалось лучшее качество биомассы, что отражалось на балансе между ростом стебля и количеством листьев. Сырая биомасса листовой части составила 71.14 г – 64.61% от общей сырой биомассы, сухая биомасса – 4.12 г;

группа 4 (KG): исследование контрольной группы растений показало, что белый спектр по сравнению с синим, положительно влияет формирование как сырой общей (67.45 г), так и сухой (3.94 г) биомассы, но влияние сочетания красного с синим света и отдельно красного способствует более глубокому проникновению в листья и формированию большей биомассы. Отмечается в данном спектре высокое соотношение листовой части по отношению к корневой – 61.48%.

4. Содержание хлорофилла

Содержание хлорофилла в листьях является важным показателем фотосинтетической активности растений. Для измерений использовался спектрофотометр, и данные приведены в виде коэффициента содержания хлорофилла на единицу площади листа:

группа 1 (B-S): Растения, освещаемые синим светом, продемонстрировали наибольшее содержание хлорофилла. Средний коэффициент содержания хлорофилла составил 2,1 мг/см². Этот результат связан с тем, что синий свет напрямую стимулирует синтез хлорофилла, необходимого для фотосинтеза;

группа 2 (R-S): В этой группе содержание хлорофилла было самым низким – 1,3 мг/см². Это объясняется тем, что красный свет больше способствует развитию биомассы и удлинению стебля, чем интенсивному фотосинтезу;

группа 3 (B+R_S): Содержание хлорофилла в этой группе было промежуточным и составило 1,8 мг/см², что свидетельствует о том, что комбинированное освещение обеспечивает хороший баланс между фотосинтетической активностью и ростом биомассы;

группа 4 (KG): белый свет в контрольной группе растений стимулирует образование хлорофилла в меньшем количестве (1.68 мг/см²) по сравнению с синим светом (2.10 мг/см²) и его комбинацией с красным (1.8 мг/см²), подтверждая, что хлорофилл наиболее интенсивно поглощает синее излучение.

5. Фотосинтетическая активность

Фотосинтетическая активность – это один из диагностических признаков физиологического состояния растений, от которого зависит их продуктивность и качество урожая. Изменение освещенности растений приводит к изменению их фотосинтетического аппарата, влияющего на поглощение световой энергии листом и поступление в клетки углекислого газа:

группа 1 (B-S): исследование показало, что фотосинтетическая активность в листьях листового салата под синим светом выше, чем в контрольной группе под белым и составила соответственно – 11.90/10.31 CO₂/м²с. При синем свете происходит полное поглощение хлорофилла и создаются условия для максимальной интенсивности фотосинтеза;

группа 2 (R-S): фотосинтетическая активность при красном свете составила 11.15 CO₂/м²с, что выше, чем в контрольной группе – 9.31 CO₂/м²с. Содержащиеся в листьях хлорофиллы и каротиноиды способны хорошо поглощать красный свет, увеличивая при этом фотосинтез листьев и проводимость устьиц;

группа 3 (B+R_S): влияние сочетания красного и синего света на фотосинтетическую активность растения составило 10.17 CO₂/м²с, выше, чем в контрольной группе;

группа 4 (KG): фотосинтетическая активность растений в контрольной группе была самой низкой – 9.31 CO₂/м²с, подтверждая, что большая часть фотосинтетической активности у растений происходит в синем и красном свете, а также в их сочетании.

Обобщенные результаты эксперимента представлены в таблице 1, которая содержит данные по каждому из изучаемых параметров.

Таблица 1.

**Морфометрические показатели выращивания *Lactuca sativa*
при различных спектрах света**

Показатель	B-S	R-S	B+R_S	KG
Длина стебля, см	8,50±0,33	15,20±0,21	11,80±0,34	10,89±0,38
Количество листьев, шт.	9,18±0,57	7,24±0,24	8,36±0,26	8,45±0,19
Сырая общая биомасса, г	95,80±3,75	120,40±4,23	110,10±4,58	109,19±3,61
Сырая биомасса листово- вой части растения, г	46,12±1,25	78,84±2,45	71,14±2,51	67,45±4,23
Сырая биомасса корне- вой части растения, г	49,68±3,58	41,56±5,10	38,96±3,34	41,74±4,25
Сухая общая биомасса, г	3,81±0,21	4,45±0,33	4,12±0,27	3,94±0,56
Соотношение листьев к общей сырой массе рас- тения, %	48,14±1,45	65,48±2,62	64,61±3,28	61,48±4,15
Содержание хлорофилла, мг/см ²	2,10±0,15	1,30±0,11	1,80±0,16	1,68±0,10
Фотосинтетическая ак- тивность, мкмоль CO ₂ /м ² с	11,90±0,18	11,15±1,10	10,17±0,89	9,31±1,17

Таким образом, полученные результаты продемонстрировали, что синий свет оказывает наибольшее влияние на фотосинтетическую активность растений и стимулирует их компактный рост с большим количеством листьев, однако приводит к снижению общей биомассы. Красный свет, напротив, стимулирует рост стебля и наибольшую биомассу, но снижает содержание хлорофилла и количество листьев.

B+R_S света продемонстрировал наиболее сбалансированные результаты, обеспечивая как умеренный рост стебля, так и высокую фотосинтетическую активность, что делает его оптимальным вариантом для выращивания *Lactuca sativa* в условиях гидропонных систем.

Обсуждение

Результаты данного исследования демонстрируют важность выбора оптимального спектра света для повышения продуктивности *Lactuca sativa* в условиях гидропоники. Полученные данные позволили оценить влияние синего, красного и комбинированного спектров на ключевые морфологические и физиологические параметры растений, такие как длина стебля, количество листьев, общая биомасса и содержание хлорофилла. Важные различия в показателях роста подтверждают значимость влияния спектра света на разные процессы роста и развития растений.

1. Влияние B-S на рост *Lactuca sativa*

Синий свет (450 нм), применяемый в первой группе, оказал значительное влияние на формирование листьев и фотосинтетическую активность растений. Повышенное содержание хлорофилла (2,1 мг/см²) и наибольшее количество листьев (в среднем 9) на одно растение подтверждают, что синий свет стимулирует фотосинтетическую активность и способствует компактному росту растений. Это согласуется с предыдущими исследованиями, которые показали, что B-S влияет на увеличение содержания хлорофилла и улучшает морфологию листьев. Однако, следует отметить, что общая биомасса растений в этой группе была наименьшей (95.8 г на растение). Это может быть связано с тем, что B-S подавляет удлинение клеток, что ограничивает рост стебля и приводит к снижению биомассы. Таким образом, использование чисто синего спектра может быть целесообразным для культур, где важны компактность и листовая масса, но не общая масса растений.

2. Влияние R-S на рост *Lactuca sativa*

Красный свет (660 нм + 740 нм), применяемый во второй группе, показал наибольшую эффективность в плане стимулирования общего роста растений. Длина стебля (в среднем 15,2 см) и общая биомасса (120.4 г на растение) были наибольшими среди всех групп, что подтверждает стимулирующее действие красного света на клеточное деление и растяжение клеток. Эти результаты согласуются с предыдущими исследованиями, которые показали, что R-S ускоряет процесс клеточного деления и способствует увеличению размеров растений.

Однако было выявлено, что R-S приводит к снижению фотосинтетической активности, о чём свидетельствует наименьшее содержание хлорофилла (1,3 мг/см²) среди всех групп. Этот факт указывает на то, что растения, хотя и имеют большую биомассу и длину стебля, могут не иметь достаточной фотосинтетической способности для поддержания длительного роста и качества листовой массы. Такие растения могут иметь более рыхлую структуру и меньшую устойчивость к неблагоприятным условиям выращивания, что может быть проблемой для длительного хранения или транспортировки продукции.

Таким образом, R-S света рекомендуется для стимулирования быстрого роста и увеличения биомассы, однако его недостаток в снижении содержания хлорофилла и плотности растений делает его менее подходящим для культур, где важны высокие фотосинтетические показатели и качество листовой массы.

3. Влияние B+R_S (синий и красный)

Комбинированный спектр света (1:1 синий и красный), применявшийся в третьей группе, показал наилучшие результаты по многим параметрам. Средние показатели длины стебля (11,8 см), количества листьев (8) и биомассы (110.1 г на растение) демонстрируют сбалансированное воздействие смешанного света на рост *Lactuca sativa*. В этой группе также наблюдалось повышенное содержание хлорофилла (1,8 мг/см²) по сравнению с группой, освещаемой чисто красным светом. Эти результаты подтверждают, что смешанный свет позволяет достичь баланса между стимулированием роста и поддержанием высокой фотосинтетической активности, что делает этот спектр оптимальным для выращивания *Lactuca sativa*.

Комбинация синего и красного света позволяет использовать преимущества каждого спектра: синий свет поддерживает активность фотосинтеза и улучшает качество листьев, а красный – стимулирует активный рост стебля и биомассы. Такие сбалансированные условия создают предпосылки для оптимального роста растений, что особенно важно для коммерческого производства в гидропонных системах. Эти результаты подтверждают необходимость применения смешанного спектра для обеспечения максимальной урожайности и качества продукции.

В контексте применения данных результатов для практического использования в гидропонных системах можно сделать следующие выводы:

Синий свет можно использовать для получения растений с плотной листовой массой и высоким содержанием хлорофилла. Это может быть полезно для специализированных культур, где важна компактность и качество зелени, например, для производства салатных смесей или декоративных растений.

Красный свет целесообразен для ускоренного производства биомассы и быстрого роста, что может быть полезно в системах, ориентированных на быстрый оборот продукции. Однако это может приводить к снижению качества продукции, что требует дополнительных корректировок светового режима на финальных стадиях выращивания.

Смешанный свет является наилучшим выбором для большинства коммерческих систем, поскольку он позволяет достичь баланса между скоростью роста, биомассой и качеством продукции. Использование смешанных спектров также снижает необходимость в частых корректировках световых условий и позволяет добиться стабильных урожаев с высокими показателями качества.

Ограничения исследования и направления для дальнейших исследований

Хотя результаты данного исследования дают ясное представление о влиянии различных спектров света на рост *Lactuca sativa*, необходимо учитывать несколько ограничений:

Исследование проводилось только на двух основных спектрах (синий и красный), однако другие части светового спектра, такие как зелёный и жёлтый свет, также могут оказывать влияние на рост растений. Будущие исследования могли бы включать изучение влияния полного спектра света или изменяющихся световых условий на разных стадиях роста растения.

Эксперимент проводился в лабораторных условиях с контролируемыми параметрами микроклимата. Хотя это позволяет точно отслеживать изменения параметров роста, условия реальных теплиц или открытых систем могут несколько отличаться. Необходимы дополнительные исследования, чтобы проверить результаты в более крупных масштабах.

В ходе исследования не учитывались параметры качества продукции, такие как содержание витаминов, минеральных веществ и антиоксидантов в листьях. Эти данные могли бы предоставить более полную картину влияния спектра света на питательную ценность продукции.

Таким образом, исследование подтвердило, что выбор спектра света является ключевым фактором для оптимизации роста *Lactuca sativa* в условиях гидропоники. Синий свет стимулирует фотосинтетическую активность и увеличивает количество листьев, но снижает общую биомассу. Красный свет, напротив, способствует активному росту стебля и увеличению биомассы, но снижает содержание хлорофилла. Наиболее сбалансированные результаты были получены в группе с комбинированным спектром света, что делает этот подход оптимальным для выращивания *Lactuca sativa* в коммерческих системах.

Заключение

Гидропонные системы, основанные на использовании светодиодных технологий с возможностью контроля спектра света, представляют собой перспективный инструмент для увеличения производительности и улучшения качества сельскохозяйственных культур. Результаты данного исследования показывают, что для выращивания *Lactuca sativa* в контролируемых условиях наиболее эффективно использовать смешанные световые спектры, что позволяет достичь наилучших результатов по биомассе и качеству растений.

В дальнейшем целесообразно продолжить исследования, направленные на изучение влияния других спектральных комбинаций света и динамических методов регулирования освещения, что позволит еще больше оптимизировать процесс роста растений в гидропонике.

Информация о спонсорстве. Работа финансировалась за счет средств гранта в форме субсидии «Приоритет-2030» в рамках проекта «Разработка природоподобной технологии выращивания растений с заданными свойствами в интеллектуальной гидропонной системе закрытого типа».

Список литературы

1. Мишанов, А. П., Маркова, А. Е., Ракутько, С. А. и др. (2015). Влияние соотношения долей зелёного и красного излучения на биометрические показатели салата. *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*, 87, 264–272. EDN: <https://elibrary.ru/VHGOPB>
2. Наконечная, О. В., Михеева, А. В., Бурдуковский, М. Л., Орловская, И. Ю., Гафицкая, И. В., Хроленко, Ю. А., Бурковская, Е. В., Субботин, Е. П., Холлин, А. С., Кульчин, Ю. Н. (2023). Влияние светодиодного освещения разного спектра на развитие салата листового (*Lactuca sativa*). *Известия Российской академии наук. Серия биологическая*, 3, 278–286. <https://doi.org/10.31857/S1026347022600406>. EDN: <https://elibrary.ru/MIAMYV>
3. Чуб, В. В., Миронова, О. Ю. (2017). Влияние различных источников света на рост и развитие растений. В: *Роль ботанических садов и дендрариев в сохранении, изучении и устойчивом использовании разнообразия растительного мира*: Материалы Международной научной конференции, посвящённой 85-летию Центрального ботанического сада Национальной академии наук Беларуси (в 2 ч., Минск, Беларусь, 06–08 июня 2017 г.), ч. 2 (с. 148–151). Минск, Беларусь: Медисонт. EDN: <https://elibrary.ru/ZBPBMP>
4. Baghalian, K., Hajirezaei, M.-R., & Lawson, T. (2023). Editorial: Current and future perspectives for controlled environment agriculture (CEA) in the 21st century. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1334641>. EDN: <https://elibrary.ru/BWTYJV>
5. Etae, N., Utaipan, T., Ruangrak, E., & Khummueng, W. (2024). Effect of artificial light sources on the growth of green oak lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown in plant factories. *Journal of Applied and Natural Science*, 16, 1376–1382. <https://doi.org/10.31018/jans.v16i3.5513>. EDN: <https://elibrary.ru/AIFUKR>
6. Feng, L., Raza, M. A., Li, Z., Chen, Y., Khalid, M. H. B., Du, J., Liu, W., Wu, X., Song, C., Yu, L., Zhang, Z., Yuan, S., Yang, W., & Yang, F. (2019). The influence of light intensity and leaf movement on photosynthesis characteristics and carbon balance of soybean. *Frontiers in Plant Science*, 9:1952. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01952>

7. Hernández-Adasme, C., Silva, H., & Escalona, V. (2022). In-door germination and seedling growth of green and red lettuce under LED-light spectrum and subsequent effect on baby leaf lettuce. *Italian Journal of Agronomy*, 17. <https://doi.org/10.4081/ija.2022.1982>
8. Imron, H., Putra, S., & Sofii, I. (2023). Effect of light spectrum LED lettuce on IoT-based indoor farming. *Biotropika: Journal of Tropical Biology*, 11, 38–43. <https://doi.org/10.21776/ub.biotropika.2023.011.01.05>. EDN: <https://elibrary.ru/WYGGLW>
9. Jalal, S., Rihan, H., Aljafer, N., & Fuller, M. (2021). The impact of light spectrum and intensity on the growth, physiology, and antioxidant activity of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Plants*, 10, 2162. <https://doi.org/10.3390/plants10102162>
10. Lee, J. G., Lee, B. Y., & Lee, H. J. (2006). Accumulation of phytotoxic organic acids in reused nutrient solution during hydroponic cultivation of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Scientia Horticulturae*, 110(2), 119–128. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.06.013>
11. Kang, S., Kim, J. E., Zhen, S., & Kim, J. (2022). Mild-intensity UV-A radiation applied over a long duration can improve the growth and phenolic contents of sweet basil. *Frontiers in Plant Science*, 13:858433. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.858433>. EDN: <https://elibrary.ru/LYLYHV>
12. Kong, Y., Masabni, J., & Niu, G. (2023). Temperature and light spectrum differently affect growth, morphology, and leaf mineral content of two indoor-grown leafy vegetables. *Horticulturae*, 9, 331. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9030331>. EDN: <https://elibrary.ru/YNFPLZ>
13. Laubinger, S., Marchal, V., Gourrierc, J., Gentilhomme, J., Wenkel, S., Adrian, J., Jang, S., Kulajta, C., Braun, H., Coupland, G., & Hoecker, U. (2006). Arabidopsis SPA proteins regulate photoperiodic flowering and interact with the floral inducer CONSTANS to regulate its stability. *Development (Cambridge, England)*, 133, 3213–3222. <https://doi.org/10.1242/dev.02481>
14. Li, J., Wu, T., Huang, K., Liu, Y., Liu, M., & Wang, J. (2021). Effect of LED spectrum on the quality and nitrogen metabolism of lettuce under recycled hydroponics. *Frontiers in Plant Science*, 12:678197. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.678197>. EDN: <https://elibrary.ru/VLMTTM>
15. McLay, E. R., Pontaroli, A. C., & Wargent, J. J. (2020). UV-B induced flavonoids contribute to reduced biotrophic disease susceptibility in lettuce seedlings. *Frontiers in Plant Science*, 11:594681. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.594681>. EDN: <https://elibrary.ru/RQULFU>
16. Ngilah, E., Tsan, F., & Kar, Y. (2015). Growth and yield of organic *Lactuca sativa* cv. Fire Red under irradiation of light emitting diode in controlled environ-

- ment. *International Journal of Agriculture, Forestry and Plantation*, 1. <https://ijafp.org/wp-content/uploads/2015/10/AG-52.pdf>
17. Ngilah, E., Tsan, F., & Yap, B. (2008). Photoperiod and light spectrum effects on growth, pigment and ascorbic acid content of *Lactuca sativa* cv. Fire Red under controlled growth environment. *International Food Research Journal*, 25(2), 1300–1308. [http://www.ifrj.upm.edu.my/25 \(03\) 2018/\(57\).pdf](http://www.ifrj.upm.edu.my/25%20(03)%202018/(57).pdf)
 18. Olle, M., & Viršile, A. (2013). The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality. *Agricultural and Food Science*, 22, 223–234. <https://doi.org/10.23986/afsci.7897>. EDN: <https://elibrary.ru/RHHNTL>
 19. Pennisi, G., Blasioli, S., Cellini, A., Maia, L., Crepaldi, A., Braschi, I., Spinelli, F., Nicola, S., Fernandez, J. A., Stanghellini, C., Marcelis, L. F. M., Orsini, F., & Gianquinto, G. (2019). Unraveling the role of red:blue LED lights on resource use efficiency and nutritional properties of indoor grown sweet basil. *Frontiers in Plant Science*, 10:305. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00305>
 20. Savvides, A., Ali, S., Tester, M., & Fotopoulos, V. (2016). Chemical priming of plants against multiple abiotic stresses: Mission possible? *Trends in Plant Science*, 21, 329–340. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.11.003>. EDN: <https://elibrary.ru/XOYXGJ>
 21. Trumpler, K., Wu, B.-S., Addo, P. W., Macpherson, S., & Lefsrud, M. (2024). Plant growth optimization using amber light supplemented with different blue light spectra. *Horticulturae*, 10(1097). <https://doi.org/10.3390/horticulturae10101097>. EDN: <https://elibrary.ru/ZTANUB>
 22. Yang, L., Chen, L., Peng, H., Guo, P., Wang, P., Ma, C.-L., et al. (2012). Organic acid metabolism in *Citrus grandis* leaves and roots is differently affected by nitric oxide and aluminum interactions. *Scientia Horticulturae*, 133, 40–46. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.10.011>
 23. Zhonghua, B., Ruifeng, C., Yu, W., Qichang, Y., & Chungui, L. (2018). Effect of green light on nitrate reduction and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L.) under short-term continuous light from red and blue light-emitting diodes. *Environmental and Experimental Botany*, 153, 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.05.010>

References

1. Mishanov, A. P., Markova, A. E., Rakutko, S. A., et al. (2015). Effect of the ratio of green and red light fractions on biometric parameters of lettuce. *Technologies and Technical Means of Mechanized Production of Crop and Livestock Products*, 87, 264–272. EDN: <https://elibrary.ru/VHGOPB>
2. Nakonechnaya, O. V., Mikheeva, A. V., Burdukovsky, M. L., Orlovskaya, I. Yu., Gafitskaya, I. V., Khrolenko, Yu. A., Burkovskaya, E. V., Subbotin, E. P.,

- Kholin, A. S., & Kulchin, Yu. N. (2023). Effect of LED lighting of different spectra on the development of leaf lettuce (*Lactuca sativa*). *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Biological Series*, 3, 278–286. <https://doi.org/10.31857/S1026347022600406>. EDN: <https://elibrary.ru/MIAMYV>
3. Chub, V. V., & Mironova, O. Yu. (2017). Effect of different light sources on plant growth and development. In: *The role of botanical gardens and arboreta in conserving, studying, and sustainably using plant diversity: Proceedings of the International Scientific Conference dedicated to the 85th anniversary of the Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus* (in 2 parts, Minsk, Belarus, June 6–8, 2017), part 2 (pp. 148–151). Minsk, Belarus: Medisont. EDN: <https://elibrary.ru/ZBPBMP>
 4. Baghalian, K., Hajirezaei, M.-R., & Lawson, T. (2023). Editorial: Current and future perspectives for controlled environment agriculture (CEA) in the 21st century. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1334641>. EDN: <https://elibrary.ru/BWTYJV>
 5. Etae, N., Utaipan, T., Ruangrak, E., & Khummueng, W. (2024). Effect of artificial light sources on the growth of green oak lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown in plant factories. *Journal of Applied and Natural Science*, 16, 1376–1382. <https://doi.org/10.31018/jans.v16i3.5513>. EDN: <https://elibrary.ru/AIFUKR>
 6. Feng, L., Raza, M. A., Li, Z., Chen, Y., Khalid, M. H. B., Du, J., Liu, W., Wu, X., Song, C., Yu, L., Zhang, Z., Yuan, S., Yang, W., & Yang, F. (2019). The influence of light intensity and leaf movement on photosynthesis characteristics and carbon balance of soybean. *Frontiers in Plant Science*, 9:1952. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01952>
 7. Hernández-Adasme, C., Silva, H., & Escalona, V. (2022). In-door germination and seedling growth of green and red lettuce under LED-light spectrum and subsequent effect on baby leaf lettuce. *Italian Journal of Agronomy*, 17. <https://doi.org/10.4081/ija.2022.1982>
 8. Imron, H., Putra, S., & Sofii, I. (2023). Effect of light spectrum LED lettuce on IoT-based indoor farming. *Biotropika: Journal of Tropical Biology*, 11, 38–43. <https://doi.org/10.21776/ub.biotropika.2023.011.01.05>. EDN: <https://elibrary.ru/WYGGLW>
 9. Jalal, S., Rihan, H., Aljafer, N., & Fuller, M. (2021). The impact of light spectrum and intensity on the growth, physiology, and antioxidant activity of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Plants*, 10, 2162. <https://doi.org/10.3390/plants10102162>
 10. Lee, J. G., Lee, B. Y., & Lee, H. J. (2006). Accumulation of phytotoxic organic acids in reused nutrient solution during hydroponic cultivation of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Scientia Horticulturae*, 110(2), 119–128. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.06.013>

11. Kang, S., Kim, J. E., Zhen, S., & Kim, J. (2022). Mild-intensity UV-A radiation applied over a long duration can improve the growth and phenolic contents of sweet basil. *Frontiers in Plant Science*, 13:858433. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.858433>. EDN: <https://elibrary.ru/LYLYHV>
12. Kong, Y., Masabni, J., & Niu, G. (2023). Temperature and light spectrum differently affect growth, morphology, and leaf mineral content of two indoor-grown leafy vegetables. *Horticulturae*, 9, 331. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9030331>. EDN: <https://elibrary.ru/YNFPLZ>
13. Laubinger, S., Marchal, V., Gourrierc, J., Gentilhomme, J., Wenkel, S., Adrian, J., Jang, S., Kulajta, C., Braun, H., Coupland, G., & Hoecker, U. (2006). Arabidopsis SPA proteins regulate photoperiodic flowering and interact with the floral inducer CONSTANS to regulate its stability. *Development (Cambridge, England)*, 133, 3213–3222. <https://doi.org/10.1242/dev.02481>
14. Li, J., Wu, T., Huang, K., Liu, Y., Liu, M., & Wang, J. (2021). Effect of LED spectrum on the quality and nitrogen metabolism of lettuce under recycled hydroponics. *Frontiers in Plant Science*, 12:678197. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.678197>. EDN: <https://elibrary.ru/VLMTTM>
15. McLay, E. R., Pontaroli, A. C., & Wargent, J. J. (2020). UV-B induced flavonoids contribute to reduced biotrophic disease susceptibility in lettuce seedlings. *Frontiers in Plant Science*, 11:594681. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.594681>. EDN: <https://elibrary.ru/RQULFU>
16. Ngilah, E., Tsan, F., & Kar, Y. (2015). Growth and yield of organic *Lactuca sativa* cv. Fire Red under irradiation of light emitting diode in controlled environment. *International Journal of Agriculture, Forestry and Plantation*, 1. <https://ijafp.org/wp-content/uploads/2015/10/AG-52.pdf>
17. Ngilah, E., Tsan, F., & Yap, B. (2008). Photoperiod and light spectrum effects on growth, pigment and ascorbic acid content of *Lactuca sativa* cv. Fire Red under controlled growth environment. *International Food Research Journal*, 25(2), 1300–1308. [http://www.ifrj.upm.edu.my/25 \(03\) 2018/\(57\).pdf](http://www.ifrj.upm.edu.my/25%20(03)%2018/(57).pdf)
18. Olle, M., & Viršile, A. (2013). The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality. *Agricultural and Food Science*, 22, 223–234. <https://doi.org/10.23986/afsci.7897>. EDN: <https://elibrary.ru/RHHNTL>
19. Pennisi, G., Blasioli, S., Cellini, A., Maia, L., Crepaldi, A., Braschi, I., Spinelli, F., Nicola, S., Fernandez, J. A., Stanghellini, C., Marcelis, L. F. M., Orsini, F., & Gianquinto, G. (2019). Unraveling the role of red:blue LED lights on resource use efficiency and nutritional properties of indoor grown sweet basil. *Frontiers in Plant Science*, 10:305. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00305>
20. Savvides, A., Ali, S., Tester, M., & Fotopoulos, V. (2016). Chemical priming of plants against multiple abiotic stresses: Mission possible? *Trends in Plant Sci-*

- ence, 21, 329–340. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.11.003>. EDN: <https://elibrary.ru/XOYXGJ>
21. Trumpler, K., Wu, B.-S., Addo, P. W., Macpherson, S., & Lefsrud, M. (2024). Plant growth optimization using amber light supplemented with different blue light spectra. *Horticulturae*, 10(1097). <https://doi.org/10.3390/horticulturae10101097>. EDN: <https://elibrary.ru/ZTANUB>
22. Yang, L., Chen, L., Peng, H., Guo, P., Wang, P., Ma, C.-L., et al. (2012). Organic acid metabolism in *Citrus grandis* leaves and roots is differently affected by nitric oxide and aluminum interactions. *Scientia Horticulturae*, 133, 40–46. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.10.011>
23. Zhonghua, B., Ruifeng, C., Yu, W., Qichang, Y., & Chungui, L. (2018). Effect of green light on nitrate reduction and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L.) under short-term continuous light from red and blue light-emitting diodes. *Environmental and Experimental Botany*, 153, 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.05.010>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Абрамова Светлана Владимировна, д.п.н., доцент, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности, Академик Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сахалинский государственный университет»
проспект Коммунистический, 33, г. Южно-Сахалинск, 693000, Российская Федерация
abramova_sv@list.ru

Бояров Евгений Николаевич, д.п.н., доцент, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности, Академик Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сахалинский государственный университет»
проспект Коммунистический, 33, г. Южно-Сахалинск, 693000, Российская Федерация
e.boyarov@mail.ru

Двойнова Наталья Федоровна, к.с.-х.н., доцент кафедры безопасности жизнедеятельности

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сахалинский государственный университет»
проспект Коммунистический, 33, г. Южно-Сахалинск, 693000, Российская Федерация
dnfsach@yandex.ru*

Купцова Олеся Витальевна, к.т.н., доцент кафедры безопасности жизнедеятельности
*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сахалинский государственный университет»
проспект Коммунистический, 33, г. Южно-Сахалинск, 693000, Российская Федерация
Korsuncevaolesy@gmail.com*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Svetlana V. Abramova, Holder of an Advanced Doctorate (Doctor of Science) in Pedagogic Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Life Safety
*Sakhalin State University
33, Kommunisticheskiy Ave., Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russian Federation
abramova_sv@list.ru
SPIN-code: 6335-3019
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9863-5287>
Scopus Author ID: 57191872091*

Evgeniy N. Boyarov, Holder of an Advanced Doctorate (Doctor of Science) in Pedagogic Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Life Safety
*Sakhalin State University
33, Kommunisticheskiy Ave., Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russian Federation
e.boyarov@mail.ru
SPIN-code: 5413-4504
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7283-1872>
Scopus Author ID: 57191878704*

Natalia F. Dvoinova, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor
of the Department of Life Safety
Sakhalin State University
33, *Kommunisticheskiy Ave.*, *Yuzhno-Sakhalinsk*, 693000, *Russian Federation*
dnfsach@yandex.ru
SPIN-code 2253-5863
Scopus Author ID: 57207776940

Olesya V. Kuptsova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of
the Department of Life Safety
Sakhalin State University
33, *Kommunisticheskiy Ave.*, *Yuzhno-Sakhalinsk*, 693000, *Russian Federation*
Korsuncevaolesy@gmail.com
SPIN-code 3157-2353
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9555-3238>
Scopus Author ID: 57363712800

Поступила 08.11.2024

После рецензирования 26.12.2024

Принята 16.01.2025

Received 08.11.2024

Revised 26.12.2024

Accepted 16.01.2025