

**ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СВЕТА РАЗЛИЧНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА И СРОКОВ УБОРКИ
НА ПРОДУКТИВНОСТЬ И БИОХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ НОВЫХ ФОРМ *RAPHANUS SATIVUS* L.,
ВЫРАЩИВАЕМЫХ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОЙ СВЕТОКУЛЬТУРЫ**

А. А. Кочетов, Н. Г. Синявина, К. В. Егорова, Н. В. Кочерина, Т. Э. Кулешова

ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»

Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14

E-mail: kochetoval@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.07.2024, принята к печати 02.09.2024

В контролируемых условиях интенсивной светокультуры изучено влияние спектрального состава источников облучения на продуктивность и показатели биохимического состава трех новых селекционных образцов редиса (*Raphanus sativus* L.), полученных с применением методологии ускоренной селекции и предназначенных для выращивания в светокультуре. Установлено, что при использовании светодиодных светильников AFI-5000 с наибольшим содержанием синего света в спектре показатели урожайности и качества всех изученных образцов не уступают аналогичным показателям контрольных растений, выращенных под натриевыми лампами высокого давления ДНаЗ-250, а содержание хлорофилла в листьях редиса, выращенного под светодиодными светильниками, превышает таковое в контроле. Выявлена четко выраженная зависимость роста урожайности от значений цветовой температуры: в варианте со светильниками AFI-5000 она была выше у сортов редиса Петербургский фиолетовый и Перно, а также линии Виола × Петербургский по сравнению с вариантами AFI-3000 и AFI-4000 на 47% и 82%, 52% и 18%, 19% и 21% соответственно. Редис сорта Перно, использовавшийся в качестве родительского сорта при селекции редиса Петербургский фиолетовый, во всех вариантах опыта характеризовался как более низкой массой корнеплодов, так и меньшей их товарностью по сравнению с созданными образцами. По-видимому, причина более низкой урожайности редиса сорта Перно состоит в том, он предназначен для выращивания в условиях открытого грунта и в светокультуре не способен полностью реализовать свой потенциал продуктивности. Выявлено, что линия Виола × Петербургский характеризуется растянутым во времени сроком уборки корнеплодов (28–40-е сутки от посева), при этом корнеплоды сохраняют свои товарные качества; а линия Октава × Петербургский еще более позднеспелая – рекомендованный срок уборки корнеплодов составляет 40 суток и более от посева. Таким образом, создана группа новых образцов *Raphanus sativus* L., адаптированных для выращивания в светокультуре, с растянутым сроком уборки (25–40 дней), что позволяет значительно увеличить урожайность редиса с кв. м (до 7–10 кг м⁻² за 40 суток вегетации) при сохранении товарных качеств корнеплодов.

Ключевые слова: методология ускоренной селекции, новые селекционные образцы *Raphanus sativus* L., светокультура, светодиодные светильники, спектральный состав, продуктивность, биохимический состав, сроки уборки.

**THE EFFECT OF DIFFERENT SPECTRAL COMPOSITION LIGHT AND HARVESTING DATES ON
PRODUCTIVITY AND BIOCHEMICAL COMPOSITION OF NEW *RAPHANUS SATIVUS* L. FORMS
GROWN UNDER CONDITIONS OF INTENSIVE LIGHT CULTURE**

A. A. Kochetov, N. G. Sinyavina, K. V. Egorova, N. V. Kocherina, T. E. Kuleshova

Agrophysical Research Institute

14, Grazhdanskiy pr., St. Petersburg, 195220, Russia

E-mail: kochetoval@yandex.ru

Under controlled conditions of intensive light culture, the influence of the spectral composition of irradiation sources on the productivity and components of the biochemical composition of three new breeding accessions of radish (*Raphanus sativus* L.), obtained on the basis of the accelerated breeding methodology and intended for cultivation under light culture conditions, was studied. It has been shown that when using AFI-5000 LED lamps with the highest content of blue light in the spectrum, the yield and quality indicators of all the studied accessions were not inferior to those of control plants grown under high-pressure sodium lamps DNaZ-250, and the chlorophyll content in radish leaves under LED lamps exceeded that in the control. A clearly expressed pattern of yield growth depending on color temperature values was revealed: in the treatment with AFI-5000 lamps, it was higher for the radish cultivars Peterburgskiy fioletovyy and Pernot, as well as the Viola × Peterburgskiy line compared to the variants AFI-3000 and AFI-4000 by 47% and 82%, 52% and 18%, 19% and 21%, respectively. It was shown that the Pernot radish cultivar, which was used as a parent cultivar in the selection of the Peterburgskiy fioletovyy radish, in all

the treatments of the experiment was characterized by both a lower mass of root crop and the crop lower marketability compared to the accessions that were created. Apparently, the reason for the lower yield of Pernot radish was that it was created for open ground conditions and was not able to fully use its productivity potential under light culture conditions. It was revealed that the Viola × Peterburgskiy line was characterized by a time-extended period for root harvesting (28–40 days from sowing), while the roots retain their commercial qualities; and the Oktava × Peterburgskiy line was ripening even later – the recommended period for harvesting roots is 40 days or more from sowing. Thus, a group of new accessions of *Raphanus sativus* L. has been created, adapted for cultivation in light culture, with an extended harvest period (25–40 days), which can significantly increase the yield of radish per square meter (up to 7–10 kg m⁻² for 40 days of a growing season) while maintaining the commercial qualities of roots.

Key words: accelerated breeding methodology, new breeding samples of *Raphanus sativus* L., light culture, LED lamps, spectral composition, productivity, biochemical composition, harvesting time.

ВВЕДЕНИЕ

Идеологическое и методологическое обеспечение смены парадигмы стратегии развития современного сельскохозяйственного производства, столкнувшегося с глобальным изменением климата, увеличивающимися темпами роста населения Земли и значительной техногенной нагрузкой на окружающую среду, является одной из важнейших задач современной науки. Базовым элементом новой стратегии, ориентированной на биологизацию и экологизацию сельхозпроизводства, должна стать адаптивная селекция, предусматривающая усиление генетического контроля устойчивости растений к абиотическим стрессорам и повышение эффективности использования благоприятных факторов внешней среды за счет гармонизации взаимодействия генотип-среда. Приоритетной задачей современной селекции становится создание высокопродуктивных, специфично адаптированных сортов, дающих стабильно высокий урожай благодаря эффективному использованию питательных веществ и влаги, устойчивых к действию основных стрессовых факторов, характерных для региона выращивания, резистентных к возбудителям различных заболеваний (Жученко, Рожмина, 2019). Немаловажными требованиями к новым сортам должны также стать их питательная ценность и биохимический состав, необходимые для обеспечения полноценного здорового питания населения.

Одним из перспективных направлений селекции может стать создание сортов различных культур, адаптированных для выращивания в полностью изолированных от окружающей среды сооружениях защищенного грунта (сити-фермы, фитотехкомплексы и т. п.) при использовании новых ресурсо- и энергосберегающих технологий и искусственного света. В последние годы современные агротехнологии на основе интенсивной светокультуры, главными преимуществами которых над традиционным сельским хозяйством являются получение овощной продукции высокого качества в непосредственной близости к потребителю и отсутствие зависимости от природно-климатических условий региона выращивания, находят широкое распространение во всем мире и интенсивно развиваются (Al-Kodmany, 2024). В настоящее время в сооружениях с полностью контролируемыми условиями среды обитания растений при выращивании различных культур наиболее широко применяются светодиодные светильники. По

сравнению с другими источниками света, светодиоды характеризуются более низким тепловым излучением и энергопотреблением, имеют длительный срок службы и позволяют формировать практически любой спектральный состав излучаемого света в зависимости от физиологических потребностей выращиваемых культур (Dsouza et al., 2023).

Комплексное решение задач, связанных с повышением устойчивости и рентабельности растениеводства, в том числе производства растительной продукции в условиях интенсивной светокультуры, диктует необходимость кардинального обновления и расширения ассортимента существующих сортов разных культур в короткие сроки (Farinati et al., 2022). Для этого требуется разработка принципиально новых подходов и методов селекции. Наиболее актуальными требованиями к современной селекции становятся повышение точности и эффективности, уменьшение объема работ, ускорение селекционного процесса при создании новых сортов с прогнозируемым комплексом хозяйственно ценных признаков. Несмотря на развитие таких методов селекции, как геномный отбор и редактирование генома, традиционные методы имеют ряд преимуществ, которые могут по-новому раскрыться при дополнении их современными методами. Развитие традиционных методов селекции при целенаправленном использовании регулируемых условий и явления трансгрессии, позволяющих ускорить селекционный процесс и гарантированно получать новые формы с прогнозируемым комплексом хозяйственно ценных признаков, является основной задачей проводимых авторами исследований (Кочетов, Синявина, 2019).

Одной из перспективных для выращивания в сооружениях с искусственным климатом культур является редис (*Raphanus sativus* L.). Он характеризуется компактными размерами, коротким вегетационным периодом и высокой пищевой ценностью не только корнеплодов, но и листьев (Singh, 2021), что позволяет широко использовать его в условиях растительных фабрик, оборудованных современными многоуровневыми системами выращивания. Авторами созданы селекционные образцы редиса с малоопушенным съедобным листом, адаптированные для условий светокультуры. Они позволяют сделать современное производство растительной продукции более рентабельным и практически безотходным. Однако вопросы оптимизации производственного процесса и снижения

себестоимости растительной продукции при выращивании редиса в светокультуре требуют более глубокого изучения. Цель данной работы – выявить особенности влияния света различного спектрального состава и сроков уборки на продуктивность и биохимический состав новых образцов редиса, предназначенных для выращивания в условиях интенсивной светокультуры. Результаты исследований могут стать основой для создания адаптивных агротехнологий выращивания новых селекционных образцов редиса в светокультуре.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объекты и условия проведения исследований

При проведении исследований использовались редис сорта Перно из коллекции ФИЦ «Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова (ВИР)» и оригинальный селекционный материал, созданный в ФГБНУ АФИ на основе методологии ускоренного получения трансгрессий по хозяйственно ценным признакам растений (Кочетов и др., 2021). Основные характеристики использованных образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Образцы *Raphanus sativus* L., использованные в исследовании

Объект	Оригинатор	Откуда получен	Основные характеристики	Особенности выращивания
Редис сорта Перно	–	ФГБНУ ФИЦ ВИР им. Н. И. Вавилова (номер каталога k-2466)	Длинноцилиндрический корнеплод розового цвета с белым кончиком, срок уборки – 25–30 суток	открытый грунт
Редис Петербургский фиолетовый	ФГБНУ АФИ	–	Эллиптический корнеплод фиолетового цвета, срок уборки – 25–30 суток*	светокультура
Линия редис Виола × дайкон Петербургский	ФГБНУ АФИ	–	Эллиптический корнеплод фиолетового цвета, срок уборки – 30–40 суток*	светокультура
Линия редис Октава × дайкон Петербургский	ФГБНУ АФИ	–	Овальный корнеплод белого цвета, срок уборки – 40–45 суток*	светокультура

Примечание: * – Sinyavina et al., 2023.

Все образцы селекции ФГБНУ АФИ предназначены для выращивания в интенсивной светокультуре, устойчивы к стеблеванию, имеют высокие темпы роста, салатный тип листа, накапливают значительную массу корнеплода за 25–40 суток вегетации, обладают сочной слабоострой мякотью.

При исследовании влияния световой среды образцы *Raphanus sativus* L. выращивались в регулируемых условиях интенсивной светокультуры на агробиополигоне ФГБНУ АФИ. Рост и развитие растений изучались в условиях 12-часового фотопериода короткого дня (12 часов). Облученность составляла 15–20 клюкс. При исследовании влияния спектрального состава световой среды использовались три различных типа светодиодных светильников: 1) АFI-3000 – светодиодные светильники с цветовой температурой 3000 К и спектральным составом в видимой области, приближенным к естественному свету, когда солнце находится у горизонта; 2) АFI-4000 – светодиодные светильники с цветовой температурой 4000 К и наиболее нейтральным освещением, приближенным к утреннему и послеобеденному свету; 3) АFI-5000 – светодиодные светильники с цветовой температурой 5000 К и

спектром, близким к солнечному свету в полдень. Светильники созданы на базе светодиодов нового поколения, излучающих фиолетовый свет и покрытых трехкомпонентным люминофором, преобразующим его в полноспектральный с полноценной красной, зеленой и синей составляющими (Kuleshova et al., 2024). В качестве контроля использовались натриевые лампы высокого давления ДНаЗ-250 (ООО «Рефлекс»), которые применялись авторами при проведении селекционно-генетических исследований, результатом которых стало создание новых образцов редиса для светокультуры. Изучение влияния сроков уборки на продуктивность новых образцов проводилось при использовании в качестве источника света натриевых ламп ДНаЗ-250, 12-часовом фотопериоде и облученности 15–20 клюкс.

При изучении влияния спектрального состава световой среды исследуемые образцы высевались сухими семенами в пластиковые кассеты для рассады размером 53×32×6 см, состоящие из 28 ячеек. В качестве корнеобитаемой среды использовался торфяной грунт – субстрат на основе верхового торфа низкой степени разложения (Агробалт С, ООО «Пиндструп», Московская область, Россия). Температура воздуха поддерживалась в пределах

+20–25°C днем и +18–20°C ночью, относительная влажность воздуха составляла 65–70%. Полив осуществлялся водой и чередовался с подкормками раствором Кнопа (1 н) три раза в неделю. Изучение влияния сроков уборки проводилось при посеве образцов *Raphanus sativus* L. сухими семенами в оригинальную ярусную светоустановку с площадью одного яруса 3 м², плотность посева составляла 150 растений м⁻², субстрат и условия выращивания были аналогичны описанным выше.

Морфофизиологические показатели

При изучении влияния световой среды на продукционный процесс редиса уборка растений осуществлялась на 28-е сутки от посева семян. При изучении влияния сроков уборки растения последовательно убирались на 25-е, 30-е, 35-е, 40-е сутки после посева семян. При уборке учитывались масса листьев и корнеплодов, размеры листовой розетки, листа и корнеплодов. На основании полученных данных рассчитывались следующие индексы: Kt – индекс хозяйственной эффективности, определяемый как отношение массы корнеплода к общей массе растения; AI – индекс аттракции, равный отношению массы корнеплода к массе листьев.

Биохимический состав получаемой растительной продукции

Влажность и содержание сухого вещества определялись (в %) методом воздушно-тепловой сушки (Ермаков, 1987), содержание нитратов – ионометрическим методом (в мг кг⁻¹ натуральной влаги (н. в.)) (Методические указания, 1990), витамина С – титрометрическим методом (в мг 100 г⁻¹ н. в.) (Скурихин, Тутельян, 1998), сахаров – титрометрическим методом по Бертрану (в процентах от сухого вещества (% а. с. в.)) (Ермаков, 1987), хлорофиллов *a* и *b* – фотометрическим методом (в мг 100 г⁻¹ н. в.) (Ермаков, 1987).

Статистический анализ

Вегетационные опыты проводились в 10-кратной повторности исследуемых растений в каждом варианте. Статистическая оценка полученных данных осуществлялась путем расчета основных описательных характеристик: среднего, стандартного отклонения, доверительного интервала. Апостериорный тест Тьюки (HSD) использовался для выявления различий между средними значениями для каждой характеристики. Значение $p \leq 0,05$ (вероятность ошибки 5%) считалось приемлемым пределом статистической значимости. Анализ данных проводился с использованием программного обеспечения Microsoft Office Excel 2019 и Statistica v. 13.3 (StatSoft Inc., Талса, Оклахома, США).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние различных источников оптического излучения на морфофизиологические показатели растений редиса

Литературные данные свидетельствуют о том, что спектральный состав света оказывает значительное влияние на рост и продуктивность различных культур. Известно, что на рост, морфогенез растений и процессы, связанные с фотосинтезом и обменом

веществ, основное влияние оказывают синий (400–500 нм), красный (600–700 нм) и дальний красный (700–800 нм) свет, так как в данных областях спектра находится максимум поглощения хлорофиллов и чувствительности фоторецепторов (Borbély et al., 2022). Другие составляющие спектра излучения (инфракрасная, зеленая и др. области) также оказывают влияние на работу фотосинтетического аппарата и метаболизм растений (Kabacheuskaya et al., 2024).

Авторами проведено исследование особенностей роста, продуктивности и биохимического состава новых образцов редиса, выращиваемых под источниками света разного спектрального состава (табл. 2).

Установлено, что средняя масса корнеплодов у образцов достоверно не различалась в разных вариантах опыта, однако масса листьев в варианте 3 (AFI-5000) была достоверно ($p \leq 0,05$) меньше у сорта Петербургский фиолетовый (ПФ) и линии редис Виола х дайкон Петербургский (ВП) по сравнению с растениями в контрольном варианте (ДНЗ-250). Длина и ширина листовой пластинки в данном варианте у разных образцов также были меньше по сравнению с контролем, а растения сформировали более компактную листовую розетку без потери массы корнеплода. Значения индексов хозяйственной эффективности и аттракции, выражающих отношение массы корнеплода к массе растения и листьев соответственно, также были максимальными у всех образцов в варианте 3 (у сорта ПФ отличия от контроля были достоверны при $p \leq 0,05$). У растений в данном варианте также наблюдалась более высокая товарность корнеплодов, что отразилось на общей урожайности. Так, у редиса сортов ПФ и Перно рост урожайности при выращивании под светильниками AFI-5000 по сравнению с контролем составил 22% и 45% соответственно, а для линии редиса ВП отличий от контроля выявлено не было. Из всех исследуемых образцов наилучшей товарностью корнеплодов при разных вариантах освещения характеризовался редис ПФ. Также была выявлена четко выраженная зависимость роста урожайности от значений цветовой температуры: в варианте AFI-5000 она была выше у образцов ПФ, ВП и Перно по сравнению с вариантами AFI-3000 и AFI-4000 на 47% и 82%, 52% и 18%, 19% и 21% соответственно (табл. 2). Редис сорта Перно во всех вариантах опыта характеризовался как более низкой массой корнеплодов, так и меньшей их товарностью по сравнению с созданными в АФИ образцами. Он исходно не адаптирован для выращивания в светокультуре, так как предназначен для открытого грунта. Этим объясняется в целом более низкая средняя масса корнеплодов и листьев у данного образца по сравнению с образцами селекции ФГБНУ АФИ. Это также характерно для других имеющихся в современном ассортименте сортов редиса, что было установлено авторами в опытах по оценке сортового разнообразия редиса в светокультуре (Кочетов, Синявина, 2019).

Таблица 2. Морфофизиологические показатели растений редиса и их урожайность при выращивании с использованием источников света различного типа и спектрального состава.

Вариант опыта (источник света)	Высота розетки, см	Диаметр розетки, см	Число листьев, шт.	Масса листьев, г	Длина корне плода, см	Диаметр корне плода, см	Масса корне плода, г	AI	Kt	Товар-ть, %	Урож-ть, кг м ⁻²
Редис сорта Петербургский фиолетовый											
Контр. ДНаЗ-250а	14,29 ±1,03	17,71 ±1,17	6,86 ±0,47	11,46 ±1,62	5,14 ±0,58	2,59 ±0,11с	19,98 ±4,51	0,63 ±0,03d	1,73 ±0,24d	85	2,82 ±0,34
% от контроля	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1. AFI-3000b	13,43 ±0,37	17,00 ±1,98	6,57 ±0,37	10,34 ±1,50	5,29 ±0,27	2,47 ±0,13	19,97 ±2,05	0,66 ±0,04	1,99 ±0,31d	70d	2,35 ±0,28d
% от контроля	94	96	95,8	90,2	102,9	95,4	99,9	104,8	115	82,4	83,3
2. AFI-4000с	14,25 ±0,90	17,75 ±1,19	6,75 ±0,46	10,62 ±1,50	5,63 ±0,75	2,21 ±0,17ad	20,53 ±3,75	0,66 ±0,02d	1,93 ±0,17d	85	2,93 ±0,35
% от контроля	99,8	100,2	98,4	92,7	109,5	85,3	102,8	104,8	111,6	100	103,9
3. AFI-5000d	12,70 ±1,18	16,50 ±1,62	6,70 ±0,40	8,79 ±1,33	5,50 ±0,54	2,76 ±0,19с	21,89 ±3,68	0,71 ±0,03ac	2,52 ±0,33abc	95b	3,45 ±0,41b
% от контроля	88,9	93,2	97,7	76,7	107	106,6	109,6	112,7	145,7	111,8	122,3
Линия редис Виола х дайкон Петербургский											
Контр. ДНаЗ-250а	17,56 ±0,93d	23,33 ±2,38d	6,00 ±0,57	14,53 ±3,24bd	5,23 ±0,63	2,52 ±0,31	21,53 ±7,17	0,59 ±0,05	1,51 ±0,31	65	2,32 ±0,35b
% от контроля	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1. AFI-3000b	18,60 ±1,71d	20,40 ±1,47	5,80 ±0,39	9,53 ±1,20a	5,10 ±0,78	2,48 ±0,43	13,56 ±6,01	0,57 ±0,07	1,38 ±,45d	55d	1,24 ±0,19acd
% от контроля	105,9	87,4	96,7	65,6	97,5	98,4	63	96,6	91,4	84,6	53,4
2. AFI-4000с	16,25 ± 0,97	20,92 ± 1,12d	6,50 ± 0,38	12,54 ± 1,59	5,42 ± 0,61	2,08 ± 0,17	17,53 ± 3,52	0,57 ± 0,04	1,43 ± 0,30	65	1,89 ± 0,28b
% от контроля	92,5	89,7	108,3	86,3	103,6	82,5	81,4	96,6	94,7	100	81,5
3. AFI-5000d	14,33 ±1,53ab	17,44 ±1,46ac	6,56 ±0,47	8,83 ±1,54a	5,17 ±0,85	2,86 ±0,54	19,36 ±6,54	0,67 ±0,05	2,17 ±0,55b	70b	2,25 ±0,34b
% от контроля	81,6	74,8	109,3	60,8	98,9	113,5	92,7	113,6	143,7	107,7	97

Вариант опыта (источник света)	Высота розетки, см	Диаметр розетки, см	Число листьев, шт.	Масса листьев, г	Длина корне плода, см	Диаметр корне плода, см	Масса корне плода, г	AI	Kt	Товар-ть, %	Урож-ть, кг м ⁻²
Редис сорта Перно											
Контр. ДНаЗ-250а	13,40 ±1,63	16,80 ±2,56	5,80 ±0,35	7,47 ±2,30	7,10 ±1,12	1,97 ±0,21b	11,56 ±4,66	0,60 ±0,08	1,59 ±0,44	60	1,15 ±0,17d
% от контроля	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1. AFI-3000b	14,80 ±1,61	18,60 ±3,40	6,00 ±0,55	9,63 ±2,29	7,50 ±1,57	1,42 ±0,15ad	14,70 ±4,57	0,60 ±0,04	1,50 ±0,27	45d	1,10 ±0,17d
% от контроля	110,4	110,7	103,4	128,9	105,6	71,1	127,2	100	94,3	75	95,7
2. AFI-4000c	14,61 ±0,98	14,83 ±1,34	6,17 ±0,30	7,68 ±1,29	7,00 ±1,01	1,69 ±0,22	12,76 ±4,01	0,61 ± 0,08	1,68 ±0,46	65b	1,38 ±0,21
% от контроля	109	88,3	106,4	102,8	98,6	85,8	110,4	101,7	105,7	108,3	120
3. AFI-5000d	14,00 ±1,34	17,14 ±2,02	5,86 ± 0,30	9,04 ±1,17	7,71 ±1,17	1,84 ±0,23b	15,45 ±2,94	0,63 ±0,04	1,75 ±0,37	65b	1,67 ±0,28ab
% от контроля	104,5	102	101	121	108,6	93,4	133,7	105	110,1	108,3	145,2

Примечание: данные в таблице представлены как среднее значение, доверительный интервал, % от контрольного значения (светильник ДНаЗ-250). Средние значения с поочередными разными надстрочными знаками ^{a-d} в строке по каждому образцу достоверно различны ($p \leq 0,05$).

Вероятной причиной появления различий в морфометрических показателях образцов редиса, выращенных под источниками света разного типа и спектрального состава, является различное соотношение физиологически значимых длин волн в спектре светильника. Наибольшая доля синего света присутствовала в спектре светильника AFI-5000 с соотношением синий: зеленый: красный диапазон 25%: 38%: 37%. Известно, что синий свет стимулирует развитие корневой системы растений, что, в свою очередь, отражается на множестве процессов, связанных с ростом и протеканием биохимических реакций. В работе N. C. Yorio с соавт. (2001) также показано, что синий свет стимулировал рост растений редиса, шпината и салата и способствовал существенному повышению их биомассы; для редиса это отмечалось в отношении как надземной части, так и корнеплода (Yorio et al., 2001). Согласно данным других исследователей, увеличение доли синего света в спектре способствовало повышению скорости

фотосинтеза и стимулировало физиологические реакции у салата, в результате чего наблюдалось увеличение сухой биомассы, количества листьев и площади листовой поверхности (Wang et al., 2016). Результаты исследований, проведенных авторами, согласуются с данными, полученными другими исследователями, и свидетельствуют о важной роли синего диапазона (наряду с зеленым и красным диапазонами длин волн) в спектре светильника при выращивании корнеплодных растений в светокультуре.

Влияние различных источников оптического излучения на биохимические показатели растений редиса

Анализ биохимического состава образцов редиса, выращенных под источниками света разного типа и спектрального состава, выявил существенные различия между образцами по исследуемым показателям в разных вариантах опыта (табл. 3).

Таблица 3. Содержание сухого вещества и суммы хлорофиллов в листьях образцов редиса при их выращивании под разными источниками света.

Биохимический показатель	Вариант 1 AFI-3000 ^a	Вариант 2 AFI-4000 ^b	Вариант 3 AFI-5000 ^c	Контроль ДНа3-250 ^d
Редис Петербургский фиолетовый				
Сухое вещество, %	7,83±0,50 ^c	8,48±0,41	8,88 ± 0,50 ^a	8,01±0,45
Сумма хлорофиллов <i>a + b</i> , мг 100 г ⁻¹ н. в.	149,84±8,39 ^{cd}	168,23±10,77 ^d	176,62±11,43 ^{ad}	106,10±6,84 ^{abc}
Линия редис Виола x дайкон Петербургский				
Сухое вещество, %	7,23±0,58 ^{bc}	9,38 ± 0,75 ^a	9,4±0,75 ^a	8,31±0,66
Сумма хлорофиллов <i>a + b</i> , мг 100 г ⁻¹ н. в.	103,62±12,44 ^c	114,62±13,76 ^d	134,30±16,12 ^{ad}	77,31±9,28 ^{bc}
Редис Перно				
Сухое вещество, %	9,31±0,84	8,90±0,80	9,23 ± 0,83	9,39±0,84
Сумма хлорофиллов <i>a + b</i> , мг 100 г ⁻¹ н. в.	129,85±15,58 ^d	150,68±18,09 ^d	131,06±15,73 ^d	88,60±10,63 ^{abc}

Примечание: данные в таблице представлены как среднее значение, доверительный интервал. Средние значения с поочередными разными надстрочными знаками ^{a-d} в строке по каждому образцу достоверно различны ($p \leq 0,05$).

В листьях редиса селекции ФГБНУ АФИ (сорта ПФ и линии ВП) наблюдалось повышение содержания сухого вещества в вариантах AFI-4000 и AFI-5000 на 5,9% и 13,1% соответственно по сравнению с контролем (ДНа3-250). Также выявлена тенденция к повышению содержания сухого вещества в листьях редиса ПФ и линии ВП в ряду AFI-3000 < AFI-4000 < AFI-5000 (различия статистически достоверны между вариантами 1 и 3, $p \leq 0,05$). Для сорта редиса Перно статистически достоверных различий между содержанием сухого вещества в листьях в разных вариантах не наблюдалось (табл. 3). В то же время содержание фотосинтетических пигментов (сумма хлорофиллов *a + b*) было существенно выше по сравнению с контролем у всех исследуемых образцов: сумма хлорофиллов повышалась на 34,0–73,7 % в зависимости от варианта опыта (табл. 3).

Биохимический анализ корнеплодов позволил выявить, что в вариантах 1–3 содержание нитратов было более низким по сравнению с контролем (на 1,7–72,5%), что оказалось наиболее характерным для линии ВП (табл. 4). Следует отметить, что в варианте 1 (AFI-3000) у всех исследуемых образцов редиса наблюдалось более высокое содержание нитратов по сравнению с вариантами 2 и 3 (AFI-4000 и AFI-5000 соответственно). При этом значения данного показателя не превышали ПДК во всех вариантах опыта. Содержание аскорбиновой кислоты (витамина С) несколько повышалось у сорта ПФ и снижалось у двух других образцов, в большей степени – у линии ВП (табл. 3, 4). Сумма сахаров повышалась у сортов ПФ и Перно в вариантах 1 и 3, а у линии ВП – во всех вариантах опыта (наиболее значительно – в варианте 3).

Таблица 4. Содержание сухого вещества, нитратов, витамина С и сахаров в корнеплодах образцов редиса при их выращивании под разными источниками света

Биохимический показатель	Вариант 1 АФИ-3000 ^a	Вариант 2 АФИ-4000 ^b	Вариант 3 АФИ-5000 ^c	Контроль ДНа3-250 ^d
Редис Петербургский фиолетовый				
Сухое вещество, %	4,75 ± 0,23 ^b	4,06 ± 0,23 ^{ac}	5,31 ± 0,30 ^{bd}	4,60 ± 0,35 ^c
Нитраты, мг кг ⁻¹ н. в.	1867,9 ± 224,2 ^c	1743,3 ± 209,2 ^c	1206,0 ± 144,8 ^{abd}	1900,0 ± 258,5 ^c
Витамин С, мг 100 ⁻¹ г н. в.	8,58 ± 0,76	8,14 ± 0,78	7,70 ± 0,74	7,60 ± 0,94
Сумма сахаров, % а. с. в.	33,27 ± 2,94 ^{bd}	22,34 ± 2,17 ^{ac}	29,64 ± 2,92 ^b	26,72 ± 3,22 ^a
Линия редис Виола х дайкон Петербургский				
Сухое вещество, %	5,24 ± 0,50 ^d	6,24 ± 0,50	5,42 ± 0,35 ^d	6,61 ± 0,58 ^{ac}
Нитраты, мг кг ⁻¹ н. в.	604,5 ± 67,7 ^d	324,6 ± 28,6 ^{ad}	458,5 ± 47,7 ^d	1664,8 ± 159,9 ^{abc}
Витамин С, мг 100 г ⁻¹ н. в.	18,48 ± 2,22 ^d	22,00 ± 2,64	18,70 ± 2,24 ^d	26,84 ± 3,22 ^{ac}
Сумма сахаров, % а. с. в.	10,54 ± 1,26 ^c	11,18 ± 1,34 ^c	19,35 ± 2,32 ^{ab}	8,97 ± 1,08 ^c
Редис Черно				
Сухое вещество, %	4,67 ± 0,34	4,63 ± 0,33	4,42 ± 0,32	5,13 ± 0,37
Нитраты, мг кг ⁻¹ н. в.	1693,1 ± 257,4	1651,6 ± 251,1	1548,1 ± 235,4	1801,3 ± 273,8
Витамин С, мг 100 г ⁻¹ н. в.	12,76 ± 1,12 ^b	9,02 ± 0,79 ^{acd}	11,66 ± 1,03 ^b	13,20 ± 1,16 ^b
Сумма сахаров, % а. с. в.	21,63 ± 1,61 ^{bd}	11,53 ± 0,83 ^{ac}	22,34 ± 1,61 ^{bd}	14,21 ± 1,02 ^{ac}

Примечание: данные в таблице представлены как среднее значение, доверительный интервал. Средние значения с поочередными разными надстрочными знаками ^{a-d} в строке по каждому образцу достоверно различны (p ≤ 0,05).

Результаты проведенного эксперимента подтверждают имеющиеся в литературе данные о существенном влиянии спектрального состава световой среды на ростовые, физиологические и биохимические процессы, происходящие в различных культурных растениях. Так, С. Burattini с соавт. (2017) показали, что использование полноспектральных белых светодиодных светильников с теплым (3000 К) и холодным (6500 К) светом при выращивании шпината оказало разнонаправленный эффект: рост растений и накопление биомассы стимулировались холодным светом (6500 К), в то время как более высокое содержание хлорофилла отмечалось у растений, выращенных под светильниками с большей долей красного света в спектре (3000 К) (Burattini et al., 2017). В работе F. Brazaitytė с соавт. (2021) показано, что увеличение доли синего света способствовало уменьшению роста в длину микрорезленей двух видов семейства Brassicaceae – листовой горчицы и листовой капусты, при этом наблюдалось повышенное накопление основных макро- и микроэлементов (Brazaitytė et al., 2021). В настоящее время интерес к выращиванию растений в промышленной светокультуре очень высок, поэтому количество научных исследований, посвященных оценке влияния световой среды на урожайность и качество растений, возрастает.

Приведенные результаты показывают, что различные культуры по-разному реагируют на спектральный состав световой среды, поэтому для создания научно обоснованных технологий производства растительной продукции в условиях

светокультуры необходимы дальнейшие исследования в данной области. Проведенные авторами эксперименты не только выявили особенности реакции редиса на свет различного спектрального состава, но и показали, что применение новых энергосберегающих светодиодных светильников позволяет получать урожай корнеплодов редиса, не уступающий или даже превосходящий по величине и качеству урожай, полученный при использовании натриевых ламп. Также важно, что новые селекционные образцы редиса значительно превосходят по урожайности и качеству продукции традиционные сорта, предназначенные для открытого грунта, а их использование в промышленном производстве овощей в защищенном грунте позволит увеличить его рентабельность и сократить затраты на выращивание единицы продукции.

Изучение динамики роста и продуктивности образцов редиса при разных сроках уборки

Созданные в АФИ линии редиса, полученные путем гибридизации дайкона Петербургский с редисом сортов Виола и Октава, согласно задачам, лежащим в основе их селекции, должны характеризоваться более продолжительным периодом вегетации и более крупными корнеплодами по сравнению с типичными сортами редиса. Для подтверждения данной гипотезы было проведено исследование их роста и продуктивности при 12-часовом фотопериоде и разной продолжительности вегетации (рис.).

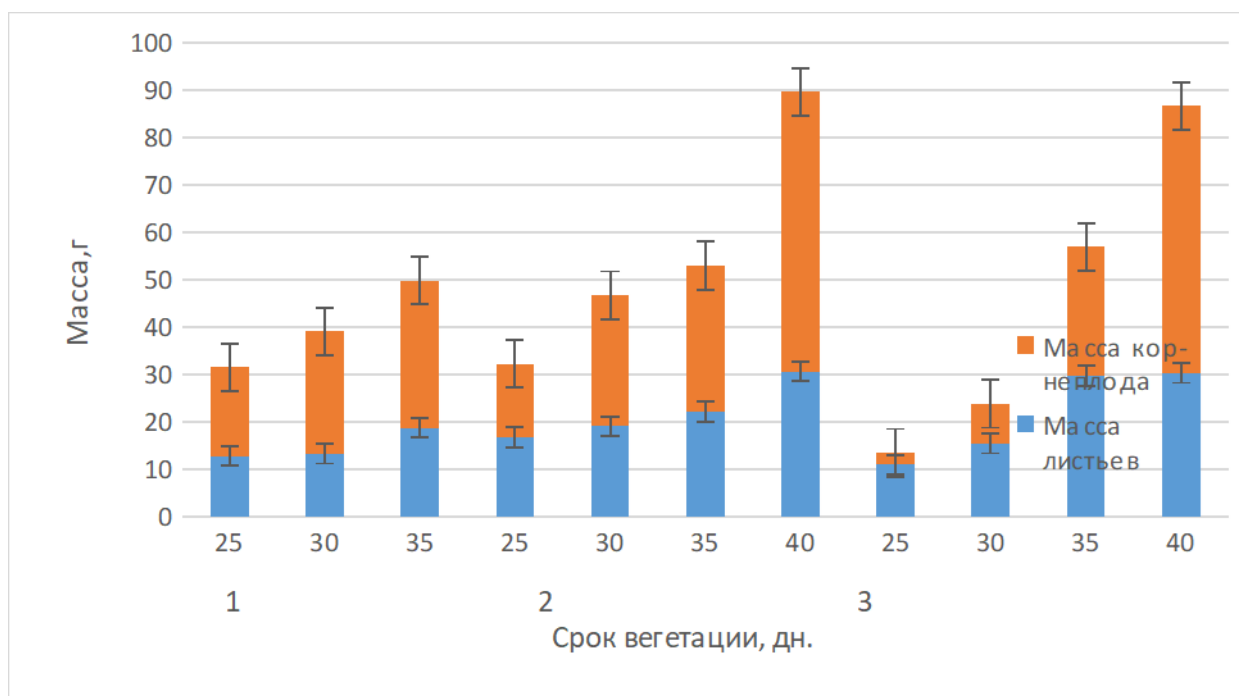


Рис. Динамика роста надземной массы и массы корнеплодов образцов редиса
1 – редис Петербургский фиолетовый; 2 – линия редис Виола x дайкон Петербургский;
3 – линия редис Октава x дайкон Петербургский

Результаты проведенного эксперимента показали, что созданные линии имеют более длительный период роста корнеплода, к 40-му дню не переходят к стеблеванию и значительно превосходят по массе корнеплодов зарегистрированный сорт редиса ПФ, рост которого существенно замедляется после 30 суток вегетации. При этом у корнеплодов созданных линий не наблюдалось снижения качества мякоти при более поздних сроках уборки. У растений линии, полученной в потомстве гибридов редис Октава x дайкон Петербургский (ОП), отмечался более поздний рост корнеплодов. Однако на 40-е сутки вегетации средняя масса корнеплода у растений данной линии практически сравнялась с массой корнеплодов более быстрорастущей линии редис ВП (56,3 г и 59,1 г соответственно). В то же время прирост корнеплодов у редиса ПФ при увеличении длительности вегетационного периода был незначительным (средняя масса корнеплодов на 30-е и 35-е сут. составляла 25,8 г и 31,1 г соответственно). Созданные линии позволяют за счет увеличения срока выращивания в светокультуре с 30 до 40 дней повысить урожайность корнеплодов с 3–4 кг м⁻² до 7–10 кг м⁻². При этом, как показывают предыдущие исследования, их продуктивность существенно не будет отличаться и при выращивании под светодиодными источниками света. Таким образом, при значительном уменьшении энергозатрат в результате использования светодиодных светильников новые образцы позволят получать в светокультуре более высокие урожаи корнеплодов редиса, что существенно повысит рентабельность производства в таких условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что при использовании светодиодных светильников АФИ-5000 все изученные образцы по показателям урожайности и качества не уступают, а по содержанию хлорофилла превосходят растения, выращенные под натриевыми лампами высокого давления ДНаЗ-250. Использование в качестве источника света светодиодного светильника со спектром, приближенным к солнечному свету в полдень (АФИ-5000 с цветовой температурой 5000 К), по сравнению со светильниками с цветовой температурой 3000 и 4000 К, способствовало повышению содержания фотосинтетических пигментов в листьях и, вероятно, лучшему усвоению световой энергии растениями. Это привело к формированию более высокой массы корнеплодов и более высокого качества растительной продукции. Выявлено, что созданные образцы редиса значительно превосходят существующие сорта по продуктивности и качеству корнеплодов, поэтому их использование позволит существенно увеличить урожайность редиса с кв. м светокультуры при более продолжительном вегетационном периоде (до 7–10 кг м⁻² за 40 суток вегетации).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории биохимии почвенно-растительных систем ФГБНУ АФИ Ю. В. Хомякову, В. Е. Вертебному, В. И. Дубовицкой и М. А. Москвину за помощь в проведении биохимических исследований растений.

Список литературы

- Ермаков А.И. Методы биохимического исследования растений. Л.: Агропромиздат, 1987. 429 с.
- Жученко А.А., Рожмина Т.А. Генетические ресурсы и селекция растений – главные механизмы адаптации в сельском хозяйстве // Вестник аграрной науки. 2019. № 6. С. 3–8. DOI: 10.15217/48584
- Кочетов А.А., Мирская Г.В., Синявина Н.Г., Егорова К.В. Трансгрессивная селекция: методология ускоренного получения новых форм растений с прогнозируемым комплексом хозяйственно ценных признаков // Российская сельскохозяйственная наука. 2021. № 6. С. 29–37. DOI: 10.31857/S2500262721060065
- Кочетов А.А., Синявина Н.Г. Стратегия создания высокопродуктивных форм редиса, адаптированных для выращивания в светокультуре // Российская сельскохозяйственная наука. 2019. № 1. С. 29–33. DOI: 10.31857/S2500-26272019129-33
- Кулешова Т.Э., Галль Н.Р., Удалова О.Р., Панова Г.Г. Многофункциональный комплекс датчиков для фитомониторинга в условиях интенсивной светокультуры // Агрофизика. 2020. Т. 4. С. 33–39. DOI: 10.25695/AGRPН.2020.04.0671
- Методические указания по определению нитратов и нитритов в продукции растениеводства. М., 1990.
- Скурихин И.М., Тутельян В.А. Руководство по методам анализа качества и безопасности пищевых продуктов. М.: Медицина, 1998. 342 с.
- Al-Kodmany K. Vertical farms for future cities // Digital Agriculture / Priyadarshan P.M., Jain S.M., Penna S., Al-Khayri J.M. (eds). Springer, Cham. 2024. pp. 179-197. DOI: 10.1007/978-3-031-43548-5_6 2024
- Borbély P., Gasperl A., Pálmai T., Ahres M., Asghar M.A., Galiba G., Müller M., Kocsy G. Light intensity- and spectrum-dependent redox regulation of plant metabolism // Antioxidants. 2022. Vol. 11. № 7. p. 1311. DOI: 10.3390/antiox11071311
- Brazaitytė A., Miliauskienė J., Vaštakaitė-Kairienė V., Sutulienė R., Laužikė K., Duchovskis P., Małek S. Effect of different ratios of blue and red led light on brassicaceae microgreens under a controlled environment // Plants. 2021. Vol. 10. № 4. p. 801. DOI: 10.3390/plants10040801
- Burattini C., Mattoni B., Bisegna F. The impact of spectral composition of white LEDs on spinach (*Spinacia oleracea*) growth and development // Energies. 2017. Vol. 10. № 9. p. 1383. DOI: 10.3390/en10091383
- Dsouza A., Newman L., Graham T., Fraser E.D. Exploring the landscape of controlled environment agriculture research: A systematic scoping review of trends and topics // Agricultural Systems. 2023. Vol. 209. p. 103673. DOI: 10.1016/j.agsy.2023.103673
- Farinati S., Betto A., Palumbo F., Scariolo F., Vannozzi A., Barcaccia G. The new green challenge in urban planning: The right genetics in the right place // Horticulturae. 2022. Vol. 8. № 9. p. 761. DOI: 10.3390/horticulturae8090761
- He X., He R., Li Y., Liu K., Tan J., Chen Y., Liu X., Liu H. Effect of ratios of red and white light on the growth and quality of pak choy // Agronomy. 2022. Vol. 12. № 10. p. 2322. DOI: 10.3390/agronomy12102322
- Kabacheuskaya E.M., Sukhoveeva S.V., Trofimov Y.V., Barkun M.I. Effect of the spectral composition of LED artificial lighting sources on the functional activity of the photosynthetic apparatus of basil leaves // Journal of Applied Spectroscopy. 2024. Vol. 90. № 6. pp. 1267–1272. DOI: 10.1007/s10812-024-01663-6
- Ke X., Yoshida H., Hikosaka S., Goto E. Optimization of photosynthetic photon flux density and light quality for increasing radiation-use efficiency in dwarf tomato under LED light at the vegetative growth stage.
- Kuleshova T.E., Zhelnacheva P.V., Ezerina E.M., Vertebny V.E., Khomyakov Yu.V., Panova G.G., Kochetov A.A., Sinyavina N.G. Influence of the light spectral composition on photosynthetic, electro- and morphophysiological indicators of small radish in conditions of light culture // Russian Journal of Plant Physiology. 2024. Vol. 71. № 2. p. 59. DOI: 10.1134/S1021443724604622
- Li Y.N., Liu N., Ji F., He D.X. Optimal red:blue ratio of full spectrum LEDs for hydroponic pakchoi cultivation in plant factory // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 2022. Vol. 15. № 3. pp. 72–77. DOI: 10.25165/j.ijabe.20221503.7362
- Saapilin N.S., Yong W.T.L., Cheong B.E., Kamaruzaman K.A., Rodrigues K.F. Physiological and biochemical responses of Chinese cabbage (*Brassica rapa* var. *chinensis*) to different light treatments // Chemical and Biological Technologies in Agriculture. 2022. Vol. 9. № 1. p. 27. DOI: 10.1186/s40538-022-00293-4
- Singh B.K. Radish (*Raphanus sativus* L.): Breeding for higher yield, better quality and wider adaptability // Advances in Plant Breeding Strategies: Vegetable Crops / Eds. Al-Khayri J.M., Jain S.M., Johnson D.V. Cham: Springer, 2021. pp. 279-304.
- Sinyavina N.G., Kochetov A.A., Kocherina N.V., Egorova K.V., Kurina A.B., Panova G.G., Chesnokov Y.V. Breeding approaches for controlled conditions of artificial light culture for small radish and radish (*Raphanus sativus* L.) // Horticulturae. 2023. Vol. 9. № 6. p. 678. DOI: 10.3390/horticulturae9060678
- Wang J., Lu W., Tong Y., Yang Q. Leaf morphology, photosynthetic performance, chlorophyll fluorescence, stomatal development of lettuce (*Lactuca sativa* L.) exposed to different ratios of red light to blue light // Frontiers in plant science. 2016. Vol. 7. p. 64. DOI: 10.3389/fpls.2016.00250
- Yorio N.C., Goins G.D., Kagie H.R., Wheeler R.M., Sager J.C. Improving spinach, radish, and lettuce growth under red light-emitting diodes (LEDs) with blue light supplementation // HortScience. 2001. Vol. 36. № 2. p. 380.

References

- Yermakov A.I. *Metody biokhimitskogo issledovaniya rasteniy* [Methods of biochemical research of plants] / Ed. A. I. Yermakov. L.: Agropromizdat, 1987, 430 p.

- Zhuchenko A.A., Rozhmina T.A. Geneticheskiye resursy i selektsiya rasteniy – glavnyye mekhanizmy adaptatsii v sel'skom khozyaystve [Genetic resources and plant breeding – the main mechanisms of adaptation in agriculture] // *Bulletin of Agricultural Science*, 2019, no. 6, pp. 3–8. DOI: 10.15217/48584
- Kochetov A.A., Mirskaya G.V., Sinyavina N.G., Yegorova K.V. Transgressivnaya selektsiya: metodologiya uskorennoy polucheniya novykh form rasteniy s prognoziruемым kompleksom khozyaystvenno tsennykh priznakov [Transgressive breeding: a methodology for accelerated production of new plant forms with a predicted complex of economically valuable traits] // *Russian Agricultural Science*, 2021, no. 6, pp. 29–37. DOI: 10.31857/S2500262721060065
- Kochetov A.A., Sinyavina N.G. Strategiya sozdaniya vysokoproduktivnykh form redisa, adaptirovannykh dlya vyrashchivaniya v svetokul'ture [The strategy of creating highly productive forms of radish adapted for cultivation under artificial light conditions] // *Russian Agricultural Science*, 2019, no. 1, pp. 29–33. DOI: 10.31857/S2500-26272019129-33
- Kuleshova T.Ye., Gall N.R., Udalova O.R., Panova G.G. Mnogofunktsional'nyy kompleks datchikov dlya fitomonitoringa v usloviyakh intensivnoy svetokul'tury [Multifunctional sensor complex for phytomonitoring under intensive photoculture conditions] // *Agrophysics*, 2020, vol. 4, pp. 33–39. DOI: 10.25695/AGRPH.2020.04.0671
- Metodicheskiye ukazaniya po opredeleniyu nitratov i nitritov v produktsii rasteniyevodstva [Guidelines for the determination of nitrates and nitrites in crop production]. M., 1990.
- Skurikhin I.M., Tutelyan V.A. *Rukovodstvo po metodam analiza kachestva i bezopasnosti pishchevykh produktov* [Guidelines on methods of analyzing the quality and safety of food products]. M.: Medicine, 1998, 342 p.
- Al-Kodmany K. Vertical farms for future cities // *Digital Agriculture / Priyadarshan P.M., Jain S.M., Penna S., Al-Khayri J.M. (eds). Springer, Cham. 2024. pp. 179-197. DOI: 10.1007/978-3-031-43548-5_6 2024*
- Borbély P., Gasperl A., Pálmai T., Ahres M., Asghar M.A., Galiba G., Müller M., Kocsy G. Light intensity- and spectrum-dependent redox regulation of plant metabolism // *Antioxidants*. 2022. Vol. 11. № 7. p. 1311. DOI: 10.3390/antiox11071311
- Brazaitytė A., Miliauskienė J., Vaštakaitė-Kairienė V., Sutulienė R., Laužikė K., Duchovskis P., Malek S. Effect of different ratios of blue and red led light on brassicaceae microgreens under a controlled environment // *Plants*. 2021. Vol. 10. № 4. p. 801. DOI: 10.3390/plants10040801
- Burattini C., Mattoni B., Bisegna F. The impact of spectral composition of white LEDs on spinach (*Spinacia oleracea*) growth and development // *Energies*. 2017. Vol. 10. № 9. p. 1383. DOI: 10.3390/en10091383
- Dsouza A., Newman L., Graham T., Fraser E.D. Exploring the landscape of controlled environment agriculture research: A systematic scoping review of trends and topics // *Agricultural Systems*. 2023. Vol. 209. p. 103673. DOI: 10.1016/j.agsy.2023.103673
- Farinati S., Betto A., Palumbo F., Scariolo F., Vannozzi A., Barcaccia G. The new green challenge in urban planning: The right genetics in the right place // *Horticulturae*. 2022. Vol. 8. № 9. p. 761. DOI: 10.3390/horticulturae8090761
- He X., He R., Li Y., Liu K., Tan J., Chen Y., Liu X., Liu H. Effect of ratios of red and white light on the growth and quality of pak choi // *Agronomy*. 2022. Vol. 12. № 10. p. 2322. DOI: 10.3390/agronomy12102322
- Kabacheuskaya E.M., Sukhoveeva S.V., Trofimov Y.V., Barkun M.I. Effect of the spectral composition of LED artificial lighting sources on the functional activity of the photosynthetic apparatus of basil leaves // *Journal of Applied Spectroscopy*. 2024. Vol. 90. № 6. pp. 1267–1272. DOI: 10.1007/s10812-024-01663-6
- Ke X., Yoshida H., Hikosaka S., Goto E. Optimization of photosynthetic photon flux density and light quality for increasing radiation-use efficiency in dwarf tomato under LED light at the vegetative growth stage.
- Kuleshova T.E., Zhelnacheva P.V., Ezerina E.M., Vertebny V.E., Khomyakov Yu.V., Panova G.G., Kochetov A.A., Sinyavina N.G. Influence of the light spectral composition on photosynthetic, electro- and morphophysiological indicators of small radish in conditions of light culture // *Russian Journal of Plant Physiology*. 2024. Vol. 71. № 2. p. 59. DOI: 10.1134/S1021443724604622
- Li Y.N., Liu N., Ji F., He D.X. Optimal red:blue ratio of full spectrum LEDs for hydroponic pakchoi cultivation in plant factory // *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2022. Vol. 15. № 3. pp. 72–77. DOI: 10.25165/j.ijabe.20221503.7362
- Saapilin N.S., Yong W.T.L., Cheong B.E., Kamaruzaman K.A., Rodrigues K.F. Physiological and biochemical responses of Chinese cabbage (*Brassica rapa* var. *chinensis*) to different light treatments // *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*. 2022. Vol. 9. № 1. p. 27. DOI: 10.1186/s40538-022-00293-4
- Singh B.K. Radish (*Raphanus sativus* L.): Breeding for higher yield, better quality and wider adaptability // *Advances in Plant Breeding Strategies: Vegetable Crops / Eds. Al-Khayri J.M., Jain S.M., Johnson D.V. Cham: Springer, 2021. pp. 279-304.*
- Sinyavina N.G., Kochetov A.A., Kocherina N.V., Egorova K.V., Kurina A.B., Panova G.G., Chesnokov Y.V. Breeding approaches for controlled conditions of artificial light culture for small radish and radish (*Raphanus sativus* L.) // *Horticulturae*. 2023. Vol. 9. № 6. p. 678. DOI: 10.3390/horticulturae9060678
- Wang J., Lu W., Tong Y., Yang Q. Leaf morphology, photosynthetic performance, chlorophyll fluorescence, stomatal development of lettuce (*Lactuca sativa* L.) exposed to different ratios of red light to blue light // *Frontiers in plant science*. 2016. Vol. 7. p. 64. DOI: 10.3389/fpls.2016.00250
- Yorio N.C., Goins G.D., Kagie H.R., Wheeler R.M., Sager J.C. Improving spinach, radish, and lettuce growth under red light-emitting diodes (LEDs) with blue light supplementation // *HortScience*. 2001. Vol. 36. № 2. p. 380.