



УДК 628.987

DOI:10.31677/2311-0651-2022-35-1-108-120

ВЛИЯНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА СВЕТОДИОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА РОСТ И РАЗВИТИЕ РАСТЕНИЙ

¹П.А. Лях, младший научный сотрудник

¹К.А. Колошина, младший научный сотрудник

¹К.И. Попова, младший научный сотрудник

²А.А. Лях, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, старший научный сотрудник

¹Сибирский научно-исследовательский институт растениеводства и селекции –
филиал Федерального исследовательского центра Институт цитологии и генетики
Сибирского отделения РАН

²Новосибирский государственный аграрный университет

E-mail: pavelljakh@mail.ru

Ключевые слова: салат, капуста белокочанная, лук репчатый, тюльпан, петрушка, картофель, пшеница, сладкий перец, томат, земляника садовая, юкка слоновая, сосна, ель, голубика, малина, земляника.

Реферат. В настоящую эпоху развития сити-фермерства, лабораторий светокультуры, тепличных хозяйств искусственное освещение является одним из главных условий при выращивании культур. Моделируя спектральный состав излучения и величину облученности, можно управлять процессами в растениях в соответствии с поставленными целями: сокращать вегетационный и генеративный периоды, стимулировать цветение, увеличивать выход биомассы, корневую массу и массу корнеплода. Вследствие этого интеллектуальный эмпирический подбор и имитирование наиболее эффективного источника света, величины облученности, а также спектральной составляющей для конкретной культуры и направления выращивания является актуальной задачей. В обзоре представлен анализ исследований влияния спектров света с различными длинами волн, а также интенсивности их излучения на фотосинтез и фотоморфогенез наиболее часто выращиваемых в светокультуре видов растений. Собранные данные позволяют сделать заключение о световых волнах, наиболее подходящих для культур при разных методах выращивания. Эта информация будет очень полезна для оценки типов искусственного освещения в различных методах культивирования и дальнейших опытах.

INFLUENCE OF THE SPECTRAL COMPOSITION OF LED RADIATION ON PLANT GROWTH AND DEVELOPMENT

¹P.A. Lyakh, Junior Researcher

¹K.A. Koloshina, Junior Researcher

¹K.I. Popova, Junior Researcher

²A.A. Lyakh, Ph.D. in Agricultural Sciences, Associate Professor, Senior Researcher

¹*Siberian Research Institute of Plant Industry and Breeding - a branch of the Federal Research Center
Institute of Cytology and Genetics,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences*

²*Novosibirsk State Agrarian University*

Key words: lettuce, white cabbage, onion, tulip, parsley, potato, wheat, sweet pepper, tomato, garden strawberry, elephant yucca, pine, spruce, blueberry, raspberry, strawberry.

Abstract. Nowadays, artificial light is one of the main conditions for growing crops in today's world with the development of city farming, light-culture laboratories and greenhouses. By modelling the spectral composition of the radiation and the irradiance value, it is possible to control plant processes by modelling the spectral composition of the radiation and the irradiance value according to the desired objectives. Such as shortening the vegetative and generative periods, stimulating flowering, increasing the biomass, root mass and root mass of root crops. As a consequence, the relevant task is the intelligent empirical selection and simulation of the most efficient light source, irradiance value as well as spectral component for a specific crop and cultivation direction. In this review, the authors presented an analysis of the effects of light spectra at different wavelengths and their intensity on photosynthesis and photomorphogenesis of the most commonly grown plant species in light culture. The data collected allow conclusions to be drawn about the light wavelengths most suitable for crops under different cultivation methods. This information will be very useful for evaluating the types of artificial light in different cultivation methods and further experiments.

Первыми в опытах с искусственным освещением растений были лампы накаливания, однако из-за большой доли лучей в инфракрасном (ИК) диапазоне и, как следствие, низкого КПД их использование не нашло широкого применения [1]. Позднее для выращивания растений в производственных теплицах, лабораториях, а также в тепличных хозяйствах стали использовать газоразрядные натриевые лампы высокого и низкого давления, а также металлогалогенные лампы ДРИ.

Равномерная освещённость растений в теплице достигается с помощью рефлекторов и различных отражателей. Продуктивность системы электрического освещения определяется спектральным составом источника света, уровнем освещённости и коэффициентом полезного действия, влияющим на эксплуатационные расходы.

Для осуществления фотосинтеза необходимы излучения в области фотосинтетически активной радиации (ФАР). Скорость фотосинтеза у растений изменяется при различном спектральном составе света, и отсутствие в излучении ламп отдельных участков спектра может привести к нарушению нормального роста растений при их длительном выращивании. Дело в том, что у всех зеленых растений максимумы поглощения хлорофилла находятся в синей (440 нм) и красной (660 нм) областях спектра, а минимум — в зелено-желтой (500–600 нм). На определенных стадиях роста и развития растений требуются различные участки видимого света в диапазоне 400–700 нм. На стадии цветения может оказаться продуктивным добавление желтого, красного и ИК-спектров. В период плодоношения и созревания для некоторых видов растений возрастает роль зеленого света (огурцы, томаты). Спектр газоразрядных ламп лишь частично заменяет спектр, необходимый для роста и развития растений. Несмотря на все возрастающую потребность в источниках излучения для теплиц и фитотронов, до сих пор

не созданы высокоэффективные растениеводческие лампы, которые должны иметь не только высокий КПД, но и благоприятный для растений стабильный спектральный состав света [2].

В настоящее время теплицы представляют собой сложные технические комплексы, в которых в основном для искусственной досветки используют газоразрядные ртутные и натриевые лампы, имеющие максимумы пиков излучения в области 550–600 нм (желтый свет) и 450 нм (синий свет) [3].

Развитие полупроводниковых технологий привело к созданию новых узкополосных источников света – сверхярких светодиодов (СД, led) с пиками излучения в строго определенных областях спектра [4].

Светодиоды представляют собой кристаллические полупроводники, залитые и не залитые специальным люминофором, при прохождении через кристалл электрического тока они начинают испускать световые волны в определенной части спектра, характерной для каждого вида кристалла и люминофора. Они также обладают рядом технических преимуществ перед другими источниками освещения: экономичность, долговечность, малый нагрев и пожаробезопасность. Благодаря применению технологии люминофоров можно ещё более разнообразить спектральную составляющую в led-светильниках, и при условии научного обоснования выбора оптимальных цветовых комбинаций для конкретных видов и сортов растений можно выявить различия в формировании фотосинтетического аппарата и урожайности, что является перспективным направлением в интенсивной светокультуре, а также позволяет создать оптимальный спектр для освещения различных видов растений, выращиваемых в лабораториях *in vitro*, *x vitro*, сити-фермерских хозяйствах, создаваемых в настоящее время по всему миру [5, 6].

Целью представленного обзора является определение механизмов воздействия разных спектральных составляющих света на морфологию, урожайность и биохимию растений в светокультуре. Полученные в ходе исследования результаты найдут свое применение при выборе оптимальных световых характеристик для искусственного выращивания растений в контролируемых условиях.

Один из таких экспериментов [7] проводили в лабораторных условиях. Культивировали салат (*Lactuca sativa*) (сорт Кучерявец одесский), капусту белокочанную (*Brassica*) (сорт Слава 1305), лук репчатый (*Allium cepa* L.) (сорт Штутгартер ризен), растения помещали под светодиодные светильники с различным спектром:

1. Набор светодиодов (красный, синий, оранжевый).
2. Набор светодиодов (красный, синий, оранжевый, белый).
3. Набор светодиодов (красный, синий, призмы).
4. Естественное освещение (контроль).

Каждое растение взвешивали, делали замер площади листьев, определяли процент сухого вещества и чистую продуктивность фотосинтеза по Ничипоровичу.

Установлено, что сухая масса при выращивании салата на товарную продукцию под третьем набором светодиодов составляла в среднем 0,70 г, а в контроле – 0,1 г, т.е. отмечалась разница в урожайности в 7 раз.

Продуктивность белокочанной капусты при естественном освещении (контроль) была в среднем 0,31 г, максимальная урожайность достигнута в спектре 3-го варианта и составила 2,54 г, что в 8,2 раза превышало контроль. Было выяснено, что накопление сухого вещества в биомассе растений зависит от спектра светодиодных светильников. Содержание сухого вещества разнилось от 7,42 % в контроле до 9,50 % в варианте 3.

Исследования показали, что биохимический состав лука зависел от спектра светодиодных светильников. При анализе обнаружили, что наивысшее количество витамина (С) накапливали листья лука в варианте 2 – 22,80 мг %, наименьшее – в контрольном варианте – 15,56 мг %.

Разница составила 1,5 раза. Содержание сахара в листьях лука варьировало от 3,67 % в варианте 2 до 1,27 % в варианте 1. Разница между вариантами по этому показателю составила 2,9 раза. Опыты показали, что наибольшее количество сухого вещества накапливали листья лука в варианте 3 (9,06 %), наименьшее – в варианте 2 (8,07 %). Разница по данному показателю составила 1,2 раза.

Выявлена зависимость развития растений от спектральной составляющей. Капуста белокочанная и салат лучше развивались под комбинацией светодиодов «красный, синий + призмы». Опыты показали, что лучший по качеству лук на перо вырос при наборе светодиодов с красным, синим, оранжевым и белым спектром, он показал наибольшее накопление витамина С.

Таким образом, можно сделать предварительные выводы, что светодиодные светильники с определенным спектром излучения могут служить альтернативным источником освещения растений при выращивании в защищенном грунте, положительно влияют на рост биомассы, накопление сухого вещества, изменение биохимических показателей в сторону улучшения вкусовых качеств растений, а следовательно, на пищевую ценность и получение существенного экономического эффекта.

Группа авторов [8] исследовала возможность применения узкополосного светодиодного излучения и проанализировала его эффективность в процессе выращивания тюльпанов (*Tulipa*) сорта Стронг Голд. Были исследованы следующие варианты излучения:

1. 70 % спектра – красный (узкополосный), 30 % – синий.
2. 59 % красного спектра, 25 – синего, 8 % – УФ и ИК.
3. Естественный свет, однако перед посадкой на каждую из луковиц тюльпанов был нанесен фунгицид Максим.
4. Естественный свет без дополнительных операций.

В рамках данной работы авторы изучили большинство морфофизиологических реакций, которые наблюдались при каждом из вышеперечисленных вариантов освещения. Они пришли к выводу, что узкополосное светодиодное облучение оказывает существенное воздействие на биометрические характеристики выращиваемого сорта тюльпанов. В вариантах 1 – 2 развитие луковиц было существенно более быстрым, чем в 3-м и 4-м: размер выросших листьев был на 17–32 (для 1-го варианта) и 3–25 % (для 2-го варианта) больше, так же как и длина генеративного побега – на 15–20 см выше, чем у контрольных. Растения не сгибались, не вытягивались, имели прочный цветонос. Авторы статьи отметили, что ускорение роста не сказалось на товарном виде продукции, а наоборот, тюльпаны имели бутоны намного большего размера и их окраска была намного ярче в сопоставлении с 3-м и 4-м вариантами.

Таким образом, полученные данные позволяют с уверенностью сказать, что применение светодиодов для выращивания тюльпанов дает заметное ускорение ростовых процессов, а также улучшает цветовую гамму растений и позволяет быстрее получить цветочную продукцию высокого качества.

С.А. Ракутько, Е.И. Ракутько [9] проведены исследования, касающиеся анализа процессов развития петрушки (*Petroselinum crispum*) под разным спектральным составом излучения. В рамках данного опыта были изучены следующие варианты излучения:

1. 33,2 % – красный, 32,4 – синий и 34,2 % – зеленый спектр.
2. 74,2 % – красный, 15,7 – синий и 9,8 % – зеленый спектр.

Уровень фотонной облученности составлял 50 мкмоль/с•м² в обоих вариантах.

В ходе эксперимента проводился анализ полученных образцов по следующим критериям: длина растения, число и масса листьев, процентное содержание сухого вещества.

Растения петрушки, выращиваемые под спектром излучения 1-го варианта, имели более крепкий и пушистый вид, большее количество листьев в розетке, большую сырую массу

листьев и большее содержание сухого вещества в листьях несмотря на несколько меньшую длину листа. Было отмечено, что увеличение общей длины листьев у растений петрушки, выращиваемых под спектром 2-го варианта, приближенного к относительной спектральной эффективности фотосинтеза в зеленом листе растения, происходит за счет вытягивания черешка при сохранении пропорций оставшейся части листа.

Практически важным является выявление зависимости показателей продуктивности светокультуры от начальной массы корнеплода. Для выяснения этого вопроса был проведен корреляционный анализ. Выявлено, что при спектре 1-го варианта наблюдается слабая положительная корреляция исходной массы корнеплодов и количества листьев в розетке. Сырая масса листьев практически не коррелировала с исходной массой корнеплодов. При спектре 2-го варианта исходная масса корнеплодов оказывает большее влияние на сырую массу листьев.

Проведенные исследования показали, что при низком уровне облученности эффективность выгонки петрушки существенно зависит от спектрального состава излучения. Это дает основания к поиску комбинаций светодиодов, которые обеспечат максимальную эффективность выгонки при минимальных затратах на освещение.

Исходя из результатов, можно сделать вывод, что рекомендуемые некоторыми производителями для светокультуры облучатели, состоящие только из комбинации синих и красных светодиодов (с большей долей красного излучения), не являются оптимальными для выгонки петрушки.

В работе Ю.Ц. Мартиросян и др. [10] опубликованы результаты исследований светодиодных облучателей на процессы роста и активность фотосинтетического аппарата у растений картофеля сорта Невский. В ходе проведения эксперимента сравнивались лампы ДНаТ, светодиодные облучатели с максимумами излучения 660 + 450 нм (2 : 1) и светодиодные облучатели с максимумами излучения 630 + 470 нм (2 : 1). Интенсивность освещения на высоте верхних листьев растений 240–280 мкмоль/с•м². Фотопериод составлял 16 ч.

В результате проведенного эксперимента было установлено, что растения, выращенные под лампами ДНаТ, показали наиболее высокую скорость роста, скорость фотосинтеза и массы клубней в сравнении со светодиодными облучателями с максимумами излучения 630 + 470 нм и 660 + 450 нм, но в конечном итоге урожайность растений под СД 660 + 450 стала сопоставима с таковой под лампами ДНаТ, что указывает на возможность использования светодиодных облучателей при выращивании растений картофеля в контролируемых условиях. Однако отсутствие в спектре облучения других участков видимого света, выполняющих важные регуляторные функции, ограничивает реализацию фотосинтетического потенциала растений. Для оптимизации роста и развития, получения максимального урожая необходимо, чтобы в спектре светодиодных облучателей были представлены все области видимого света с преобладанием красных, зеленых, синих и фиолетовых лучей, а также небольшая доля ультрафиолетового и инфракрасного света. Роль каждого из них в отдельности и в различных сочетаниях предстоит исследовать в дальнейших экспериментах.

Работа Т.В. Нионович и др. [11] проводилась на кафедре сельскохозяйственной биотехнологии, экологии и радиоэкологии БГСХА. Объектами исследования выступали три белорусских сорта картофеля (*Solanum tuberosum* L.): раннеспелый Лилея, среднеранний Архидея и среднеспелый Скарб.

Для получения стабильно высоких урожаев картофеля важно использовать оздоровленный посадочный материал. Начальный этап современной системы семеноводства базируется на биотехнологических методах, основным из которых является получение из апикальных меристем свободных от инфекции растений и их размножение *in vitro*.

Главная задача при производстве оздоровленных растений картофеля – это увеличение коэффициента размножения и скорости отрастания после черенкования, поэтому вопрос необходимости оптимизации условий выращивания *in vitro* стоит достаточно остро.

Целью исследования являлось выявление сортовых различий у растений-регенерантов картофеля в культуре *in vitro* под влиянием спектрального состава света, определение изменчивых и стабильных признаков, а также выбор оптимального типа светильника для применения при микроклональном размножении в контролируемых условиях.

Черенки помещали по одному в пробирки для культивирования с искусственной питательной средой Мурасиге-Скуга. Источниками света являлись светодиодные светильники, в которых отношение ППФ (плотность потока фотонов) оранжево-красной полосы (607–694 нм) к ППФ синей полосы (400–495 нм) варьировало от 1 до 20. При этом доля ППФ в диапазоне 580–607 нм (желтый) варьировала от 13 до 22 %, а доля фотонов в диапазоне 495–580 нм (зеленый) – от 18 до 38 %. Всего испытано 12 вариантов освещения. В качестве контроля использовались люминесцентные лампы с ППФ $38,2 \pm 13,4$ мкмоль/с•м².

Проведенные исследования показали, что тип светильника оказывал достоверное значимое влияние на проявление морфологических признаков растений-регенерантов картофеля в культуре *in vitro*. Признаки, в наибольшей мере реагирующие на спектральный состав света, – площадь листовой пластинки, индекс формообразования растения-регенеранта и эффективный фотохимический квантовый выход ФСП. Для микроклонального размножения картофеля самым оптимальным типом светильника был вариант со спектральным соотношением красный/синий 1 к 3 и уровнем ППФ не менее 70,1 мкмоль/с•м², поскольку только он обеспечивал наибольшие средние значения признаков в сочетании с минимальными сортовыми различиями.

Полученные данные свидетельствуют о значительном влиянии спектрального состава и типа используемого излучателя на функциональные характеристики фотосинтетического аппарата при размножении растений картофеля в культуре *in vitro*.

В экспериментальной работе Е.П. Субботина и др. [12] объектами исследования являлись оздоровленные растения-регенеранты картофеля Рождественский и Снегирь. Для этого опыта использовали разработанный светодиодный источник света с имитацией солнечного спектра, излучение которого находилось в диапазоне 440 – 660 нм.

Исследовали 4 варианта фотосинтетически активного потока фотонов различной плотности: в 1-м варианте растения подвергались максимальному облучению – 382 мкмоль/с•м², в остальных вариантах пробирки помещали под индивидуальные светофильтры различной плотности, которые уменьшали уровень светового потока без изменения спектрального состава света. Эксперимент проводился 35 суток.

В контроле использовали люминесцентные лампы, которые имели ППФ 48,9 мкмоль/с•м². Проводили измерения биометрических показателей растений: высоты растения, размеров листа, количества листьев, сырой массы надземной части растений и корней.

Ход эксперимента показал, что при облучении 382 мкмоль/с•м² значения размерных признаков были близки к контрольным, но показатели количества листьев и сырой массы надземной части были ниже на 30 и 46 %.

При понижении интенсивности излучения почти в 1,5 раза – до 230,1 мкмоль/с•м² отмеченные значения высоты и сырой массы растений были соответственно в 2,8 и 1,9 раза ниже, чем показано для контрольных растений.

Наилучшие показатели роста и развития растений получены при облученности 135,5 мкмоль/с•м². Темпы прироста длины стеблей превышали контрольные значения в 2–3 раза. Растения при облучении искусственным солнечным светом имели большие по размеру листья и стебли, корневая система развита интенсивнее. В целом средняя сырая масса растений (зеленой и корневой массы) при облученности 135,5 мкмоль/с•м² составляла 0,55 г

против 0,34 г в контроле. Полученные результаты показали, что при интенсивности излучения 135,5 мкмоль/с•м² наряду с увеличением размеров растения и количества листьев происходит четырехкратное увеличение сырой массы корней по сравнению с обычными условиями культивирования, используемыми в светокультуре растений. Доля вклада корня в биомассу всего растения при этих условиях составляла 47,3 %, в то время как в контроле – 20,6 %.

На основании проведенных экспериментов можно сделать вывод о том, что выращивание растений-регенерантов (*Solanum tuberosum*) при искусственном освещении со спектром излучения, близким к спектру солнца в диапазоне частот 440–660 нм, и облученностью 135,5 мкмоль/с•м² увеличивает активность процессов роста, способствует повышению массы корней и интенсивному развитию надземной части, что в перспективе, вероятно, позволит сократить сроки вегетации, ускорить столонообразование и повысить урожайность безвирусных мини-клубней.

В работе И.В. Азизова и др. [13] использованы в экспериментах два сорта озимой пшеницы – Саратовская 29 (*Triticum aestivum* L.) и Баракатли 95 (*Triticum durum* Desf.).

Целью исследований являлось изучение влияния красного и синего освещения на проявление активности каталазы и аскорбатпероксидазы, а также анализ содержания белков и углеводов в листьях пшеницы сортов Саратовская 29 и Баракатли 95 в случае воздействия на нее NaCl. Растения выращивали в лабораторных условиях в водной среде, их покрывали прозрачными пленками, пропускающими свет при длинах волн 420–480 нм (синий свет) и 640–680 нм (красный свет). Результатом данной работы стало получение следующих выводов:

- синее освещение оказывает стимулирующее влияние на процесс синтеза протеинов, препятствует формированию H₂O₂ при воздействии на культуру NaCl;
- красное освещение стимулирует процесс образования углеводов и также препятствует формированию H₂O₂ при воздействии на культуру NaCl.

Е.Н. Ракутько и др. [14] проводили исследования по воздействию спектра светодиодного излучения на уровень флуктуирующей асимметрии (ФА) растений сладкого перца (*Capsicum annuum*) сорта Богатырь. Меньшее значение ФА определяется большей стабильностью развития растения и соответственно наибольшей продуктивностью по сырой массе. Большие значения (ФА) означают, что растения находятся в неблагоприятных условиях.

В рамках данной работы были исследованы следующие варианты светодиодного излучения (для определенных зон):

- первая зона: 26,2 % – синий, 24,3 – зеленый, 49,5 – красный, 3 % – дальний красный;
- вторая зона: 22,4 % – синий, 28,1 – зеленый, 49,5 – красный, 26,7 % – дальний красный;
- третья зона: 39,1 % – синий, 20,9 – зеленый, 40 – красный, 12,9 % – дальний красный.

В результате была получена достаточно высокая частота повторяемости асимметричных характеристик у перца, выращенного в различных условиях освещения.

Основным фактором повышенной стабильности развития растений перца в опыте следует признать использование источников с большей долей красного излучения относительно синего. При увеличении отношения красного к синему излучению в 2,2 раза величина ФА уменьшалась на 22–45 % в зависимости от диапазона, в котором определялись оптические плотности листьев. При этом наблюдалось увеличение массы растения на 26,2 %. Полученные в результате анализа показатели могут применяться с целью проведения оценки качества освещения, применяемого для роста растений перца.

В работе М.Н. Яковцевой, И.Г. Тараканова [15] объектом исследований были 8 отечественных и зарубежных сортов растений земляники садовой (*Fragaria x ananassa* Duch.), отбор сортов велся по принципу выбора самых высоких показателей хозяйственно-ценных признаков. В эксперименте принимали участие 3 ремонтантных длинноплодных сорта

(Фламенко, Елизавета II, Сельва) и 5 неремонтантных короткодневных сортов (Богема, Вечная весна, Говоровская, Ранняя плотная, Снежана).

Использовали 3 варианта светодиодных светильников:

1. 660 нм и 460 нм с соотношением красных и синих (СД) 2 : 1 (К : С 2 : 1) и плотностью потока фотонов 250 мкмоль/с•м².

2. 660 нм и 460 нм с соотношением красных и синих (СД) 8 : 1 (С 8:1) и плотностью потока фотонов 250 мкмоль/с•м².

3. Газоразрядные лампы ДНаЗ, 300 мкмоль/м²•с.

Проведенные исследования показали сортоспецифичную реакцию растений земляники садовой на спектр света. Освещение в варианте (К : С 2 : 1) с высокой долей синей составляющей в спектре вызвало задержку перехода к генеративному развитию короткодневных сортов (Богема, Ранняя плотная, Говоровская) на 1–2 недели по сравнению с остальными вариантами опыта. Этот вариант освещения способствовал увеличению удельной поверхностной плотности листьев и более интенсивному синтезу хлорофиллов а и b, содержание их было в 1,4–1,5 раза выше, чем в контроле. Растения имели компактный габитус, укороченные черешки листьев и цветоносы, рост вегетативных органов растений всех короткодневных сортов стал заторможенным, а также стала ингибироваться закладка вегетативных почек и вегетативных побегов. Высокая доля синего спектра приводила к уменьшению количественных показателей урожая у большинства короткодневных сортов и ремонтантного сорта Фламенко, а также к снижению содержания сухих веществ и сахаров в плодах и, напротив, приводила к увеличению содержания витамина С в плодах (Богема, Фламенко и Елизавета II) по сравнению с другими вариантами опыта.

Уменьшение доли синего спектра в световом потоке (К : С 8 : 1) способствовало более раннему переходу к генеративному развитию сортов Говоровская и Снежана, при этом у сортов Богема и Снежана в данном варианте наблюдалась вторая волна плодоношения, не характерная для короткодневных сортов земляники. Активнее шел биосинтез хлорофилла у сортов Богема, Фламенко и Сельва. Снижение доли синего спектра в световом потоке (К : С 8 : 1) привело к активному биосинтезу хлорофилла у сортов Богема, Фламенко и Сельва и значительному увеличению урожайности у сортов Вечная весна, Говоровская, Ранняя плотная и Снежана, показатели которых в данном варианте были максимальными и превышали контроль (НЛВД). Это способствовало также накоплению в плодах сухих растворимых веществ и сахаров. Напротив, у ремонтантных сортов земляники режим освещения с низкой долей синего света в спектре способствовал снижению содержания сахаров в зрелых плодах, показатели которых в 1,2–1,5 раза уступали контрольному варианту (сорта Фламенко и Елизавета II). Этот световой режим у всех сортов привел к снижению содержания аскорбиновой кислоты.

Таким образом, светодиоды являются перспективными источниками света для растений в условиях светокультуры. Однако для создания на их основе светильников, обеспечивающих адекватные условия освещения растений, необходимо дальнейшее исследование физиологических эффектов узкополосного освещения с учётом энергетической и регуляторной роли спектральных составляющих освещения.

Формирование продуктивности растений определяется процессами роста как на уровне целого растения, так и на тканевом, клеточном и других, более низких, уровнях организации фотосинтетического аппарата. Среди них весьма важным представляется изучение различных показателей мезоструктуры листа, которая весьма чувствительна к спектральному составу света, что может быть охарактеризовано показателями роста и клеточной дифференцировки ткани листа [16, 17].

Изменение мезоструктуры листьев рассматривается как существенное проявление регуляции фотосинтеза на морфогенетическом уровне, обеспечивающее оптимизацию и адаптацию фотосинтетического аппарата при разных экологических режимах.

А.Л. Немойкиной, Р.А. Карначук [17, 18] исследовано влияние света и гормонов на мезоструктуру листьев растений юкки слоновой (*Yucca elephantipes* R.) в культуре *in vitro*. В эксперименте использовали регенеранты высотой 2 см с 3 листьями и культивировали их с разным соотношением гормонов и без них (контроль).

Растения освещали белым (БС), красным (КС) и синим светом (СС), а также белым с красным (БС + КС) и белым с синим (БС + СС). Для всех ламп плотность потока квантов составляла 30 мкмоль/с•м².

Результаты показали, что разные комбинации спектра света способствуют изменению баланса эндогенных гормонов. Листья меняли свою мезоструктуру как при обработке экзогенными гормонами, так и при действии света через изменение баланса эндогенных гормонов. В среде культивирования *in vitro* освещение с присутствием красного спектра позволяет уменьшить вносимую концентрацию экзогенных ауксинов, а свет с долей синей части спектра вызывает повышение уровня эндогенных цитокининов, что дает возможным уменьшить концентрацию экзогенного БАП при освещении БС+СС.

Таким образом, правильный подход к освещению растений *in vitro* позволяет сэкономить на гормонах.

В Институте физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН проводили опыт [19] по воздействию света на морфогенез ассимилирующих органов сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и ели европейской (*Picea abies* L.).

В каждой камере выращивания присутствовали светодиодные матрицы мощностью 50 Вт красного (660 нм) и синего света (465 нм), выровненные по плотности потока фотонов (150±30 мкмоль/с•м²). В контроле использовали люминесцентные лампы холодного света OSRAM L36W/765 (150±30 мкмоль/с•м²).

Проводили оценку темпов накопления биомассы, содержания хлорофилла а, b и каротиноидов, измеряли среднюю длину семядолей и хвои, а также подсчитывали их количество.

Анализ полученных данных показал, что при облучении красным светом 660 нм сеянцы исследуемых видов были сопоставимы по массе с контрольными растениями, но отличались от них более крупными хвоинками, семядолями и пониженным содержанием основных фотосинтетических пигментов. Действие красного света понижало содержание фотосинтетических пигментов у обоих видов растений в пределах 40–50 %. Это могло определяться меньшей потребностью в них у реакционных центров фотосистем в условиях избытка поглощенной световой энергии.

При облучении синим (465 нм) светом рост и развитие ели, напротив, значительно ингибировались: растения имели наименьшую массу органов, тонкую хвою с высоким содержанием хлорофилла. Это могло быть обусловлено тем, что синий свет обладает максимальной энергией квантов потока, и его избыток негативно отразился на сеянцах хвои. Несмотря на это синий свет имеет большое значение как важный сигнальный фактор, действующий во множестве физиологических и онтогенетических процессов.

Таким образом, действие красного (660 нм) света явно продемонстрировало стимулирующее действие на удлинение хвои сеянцев сосны, но реакция на апикальную меристему, которая обеспечивает заложение новых листовых зачатков побега, не распространялась. У ели воздействие красного света было более масштабным, оно не только стимулировало пластинчатую меристему хвои, ответственную за рост органа в длину, но и приводило к заложению большого числа листовых зачатков на точке роста, что повлияло на увеличение количества хвоинок.

В работе А.А. Волотович и др. [20] в качестве объекта исследований использовались размножаемые *in vitro* регенеранты сортов Northland и Brigitta голубики высокой (*V. corymbosum* L.).

В качестве источников освещения использовали люминесцентные лампы OSRAM Natura (4 лампы – 6000 лк, потребляемая мощность одной лампы – 36 Вт, CCT – 6200–6500 К) и оригинальные установки освещения на основе светодиодов, представляющие собой надеваемый на колбу пластиковый колпачок со встроенными с внутренней стороны пятью светодиодами (ARL-5213-UVS – 400 нм; ARL-3014-UWS – 400 нм; ARL – 630 нм). Величина освещенности из расчета на один опытный образец около 20000 лк.

Высота обоих исследуемых сортов под светодиодами была достоверно в (1,3 раза) выше по сравнению с высотой растений под люминесцентными лампами. Установлена тенденция к увеличению коэффициентов размножения для каждого из исследуемых сортов при светодиодном освещении. Анализ изменчивости показателей сырой массы не выявил достоверных различий между вариантами опыта. При этом масса ягод голубики сорта Brigitta под светодиодами была выше, а сорта Northland – ниже по сравнению с массой формируемых при люминесцентном освещении. У исследуемых сортов (Brigitta и Northland) под светодиодами наблюдалось достоверное превышение по содержанию хлорофилла а – в 1,64 и 2,53 раза, хлорофилла b – в 1,92 и 2,75, каротиноидов – в 1,38 и 2,13 раза соответственно. Двухфакторный дисперсионный анализ установил, что на изменчивость содержания фотосинтетических пигментов влияют два фактора: сорт голубики и тип освещения.

Изучение влияния света разного спектрального диапазона на рост и развитие микропобегов малины (*Rubus idaeus*) и ежевики (*Rubus*) проводили на кафедре генетики, биотехнологии, селекции и семеноводства РГАУ – МСХА им. К. А. Тимирязева [21].

Для этого растения *in vitro* помещали под светодиодные (СД) лампы с разными максимумами в спектральном составе:

- 1) СД красный (660 нм);
- 2) СД синий (444 нм);
- 3) газоразрядная натриевая лампа высокого давления (НЛВД) (602 нм);
- 4) СД белый (653 нм);
- 5) СД-ЧЛБ (чип белый с люминофором 623 нм);
- 6) СД зелёный (515 нм);
- 7) контроль – люминесцентные белые лампы (марка OSRAM AG, производство – Германия).

Установлено, что освещение оказывает индивидуальное воздействие на рост и развитие микропобегов, а также на коэффициент их размножения. Для ежевики наиболее благоприятные условия выращивания микрочеренков установлены при использовании СД синий и СД-ЧЛБ, в то время как для малины ни один из исследуемых вариантов света не оказал существенного влияния на коэффициент размножения.

На основании выполненного обзора можно с уверенностью сказать, что влияние спектральной составляющей светодиодного излучения и интенсивности облучения на рост и развитие растений является достаточно высоким и для каждой культуры и сорта проявляется индивидуально. В то же время наблюдаются закономерности в отношении спектра к морфологии и биометрии, например, излучение белого света с доминантой в синей (440 нм) области оказывает положительное влияние на коэффициент микроразмножения в культуре *in vitro* и позволяет уменьшить вносимую долю гормонов в среду для выращивания. Увеличение доли красной составляющей (660 нм) по отношению к синей (440 нм) способствует к более быстрому переходу от вегетативного к генеративному состоянию, что, в свою очередь, позволяет ускорить темпы роста в интенсивной светокультуре.

Светодиодные светильники с индивидуально моделируемым излучением могут служить альтернативным источником освещения растений при выращивании в защищенном грунте и являться дополнением к газоразрядным лампам, чтобы усилить те участки спектра, которых недостаточно. Данный вектор исследований на сегодняшний момент остается малоизученным, особенно что касается областей в ультрафиолетовом и дальнем красном диапазонах. До сих пор остается неясным, какое количество фотонов света, какой плотности и спектра нужно получить растению за день в определенной стадии культивирования, чтобы избежать как ингибирования роста, так и этиоляции, при этом учитывая количество затраченной энергии к выходу готовой продукции либо коэффициент размножения *in vitro*. Нужно дальше продолжать эксперименты в этом направлении для того, чтобы составить полную карту спектральной кривой и её интенсивности для каждой культуры и сорта в каждой из стадий роста, а также определить сортоспецифичный отклик на доминанту спектра в свете, что позволит наиболее эффективно раскрыть весь потенциал сельскохозяйственных растений.

Работа поддержана бюджетным проектом ИЦиГ СО РАН №0259-2019-0011.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Леман В.М. Курс светокультуры растений. – М.: Колос, 1970.
2. Соколов А.В. Обоснование параметров и разработка широкополосной системы освещения растений в защищенном грунте с резонансным электропитанием: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – М., 2015. – 23 с.
3. Культивирование салата в условиях защищенного грунта на Севере / А.В. Буткин, Е.Е. Григорай, Т.К. Головкин, Г.Н. Табаленкова, И.В. Далькэ // Аграрная наука. – 2011. – № 8. – С. 24–26.
4. Шуберт Ф.Е. Светодиоды. Профессиональный справочник. – М.: Физматлит, 2008. – 496 с.
5. Аверчева О.В. Физиологические эффекты узкополосного красно-синего освещения растений (на примере китайской капусты *Brassica chinensis* L.): автореф. дис. ... канд. биол. наук. – М., 2010. – 25 с.
6. Особенности роста и фотосинтеза растений китайской капусты при выращивании под светодиодными светильниками / О.В. Аверчева, Ю.А. Беркович, А.Н. Ерохин, Т.В. Жигалова, С.И. Погосян, С.О. Смолянина // Физиология растений. – 2009. – № 56 (1). – С. 17–26.
7. Курьянова И.В., Олонина С.И. Оценка влияния различных спектров светодиодного светильника на рост и развитие овощных культур // Вестник НГИЭИ. – 2017. – № 7 (74). – С. 35–44.
8. Использование узкополосного спектра фотосинтетически активной радиации при выгонке тюльпанов и их защите от болезней / О.В. Шепелова, В.В. Кондратьева, И.Н. Калембет, Т.В. Воронкова, М.В. Семенова, О.О. Белошапкина, Л.Г. Серая // Достижения науки и техники АПК. – 2018. – № 9 (32). – С. 70–73.
9. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н. Рост и фотоморфогенез петрушки корневой (*Petroselinum tuberosum*) под оптическим излучением различного спектрального состава // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2015. – № 38. – С. 298–304.
10. Фотосинтез и продуктивность растений картофеля в условиях различного спектрального облучения / Ю.Ц. Мартиросян, М.Н. Полякова, Т.А. Диловарова, А.А. Кособрюхов // Сельскохозяйственная биология. – 2013. – № 1. – С. 107–112.
11. Анализ сортовых различий растений-регенерантов картофеля *in vitro* при использовании светодиодных светильников / Т.В. Никонович, Т.В. Кардис, А.В. Кильчевский, В.Л. Филиппеня, О.В. Чижик, Ю.В. Трофимов, В.И. Цвирко, Е.В. Керножицкий // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2018. – № 1. – С. 73–78.
12. Влияние искусственного солнечного света на рост и развитие растений-регенерантов *Solanum tuberosum* / Е.П. Субботин, И.В. Гафицкая, О.В. Наконечная, Ю.Н. Журавлев, Ю.Н. Кульчин // *Turczaninowia*. – 2018. – № 2. – С. 32–39.

13. Влияние синего и красного света на физиологические и биохимические характеристики растений пшеницы / И.В. Азизов, Ф.И. Гасимова, У.Ф. Ибрагимова, К.Р. Тагиева, А.Б. Абдуллаева // Sciences of Europe. – 2019. – № 41. – С. 3–6.
14. Влияние различий в спектральном составе излучения на флуктуирующую асимметрию билатеральных признаков ювенильных растений перца (*Capsicum annuum* L.). / Е.Н. Ракутько, А.Н. Васькин, И.С. Новиков, С.А. Ракутько // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2020. – № 1(102). – С. 35–48.
15. Яковцева М.Н., Тараканов И.Г. Технология выращивания растений земляники садовой *Fragaria ananassa* Duch. на основе использования узкополосного спектра фотосинтетически активной радиации // Международный научно-исследовательский журнал. – 2014. – № 2. – С. 177–180.
16. Кахнович Л.В. Фотосинтетический аппарат и световой режим. – Минск: Изд-во БГУ, 1980. – 142 с.
17. Карначук Р.А., Протасова Н.Н., Головацкая И.Ф. Рост растений и содержание гормонов в зависимости от спектрального состава света // Рост и устойчивость растений. – Новосибирск: Наука, 1988. – С. 71–75.
18. Немойкина А.Л., Карначук Р.А. Совместное действие света разного спектрального состава и экзогенных гормонов на мезоструктуру *Yucca elephantipes* R. в культуре *in vitro* // Исследовано в России. – 2002. – Т. 5. – С. 1930–1937.
19. Морфогенез ассимилирующих органов сеянцев сосны обыкновенной и ели европейской при действии красного и синего света / А.В. Карташов, П.П. Пашковский, Ю.В. Иванов, А.И. Иванова, Ю.В. Савочкин // Вестник Том. гос. ун-та. Биология. – 2014. – № 1 (26). – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/morfogenez-assimiliruyuschih-organov-seyantsev-sosny-obyknovennoy-i-eli-evropeyskoj-pri-deystvii-krasnogo-i-sinego-sveta-1> (дата обращения: 13.03.2022).
20. Сравнительный анализ эффектов разных источников освещения на изменчивость количественных признаков у регенерантов сортовой голубики высокой (*Vaccinium corymbosum* L.) *in vitro* / А.А. Волотович, О.А. Кудряшова, А.С. Кохнюк, Л.С. Цвирко // Вестник Полесского государственного университета. – 2011. – № 2. – С. 24–28.
21. Гудь Л.А. Влияние света разного спектрального диапазона на морфогенез ежевики и малины *in vitro* [Электронный ресурс] // Лесохозяйственная информация: электрон. сетевой журн. – 2019. – № 2. – С. 97–102. – Режим доступа: <http://lhi.vniilm.ru/> (дата обращения: 13.03.2022).

REFERENCES

1. Leman V.M. *Kurs svetokul'tury rastenij* (The course of light culture of plants), Moscow, Kolos, 1970.
2. Sokolov A.V. *Obosnovanie parametrov i razrabotka shirokopolosnoj sistemy osveshcheniya rastenij v zashchishchennom grunte s rezonansnym elektropitanijem* (Substantiation of parameters and development of a broadband plant lighting system in protected ground with resonant power supply), Extended abstract of candidate's thesis, Moscow, 2015, 23 p. (In Russ.)
3. Butkin A.V., Grigoraj E.E., Golovko T.K., Tabalenkova G.N., Dal'ke I.V., *Agrarnaya nauka*, 2011, No. 8, pp. 24–26. (In Russ.)
4. Shubert F.E. *Svetodiody. Professional'nyj spravocchnik* (Leds. Professional reference), Moscow, Fizmatlit, 2008, 496 p.
5. Avercheva O.V. *Fiziologicheskie efekty uzkopolosnogo krasno-sinego osveshcheniya rastenij (na primere kitajskoj kapusty Brassica chinensis L.)* (), Extended abstract of candidate's thesis, Moscow, 2010, 25 p. (In Russ.)
6. Avercheva O.V., Berkovich Yu.A., Erohin A.N., Zhigalova T.V., Pogosyan S.I., Smolyanina S.O., *Fiziologiya rastenij*, 2009, No. 56 (1), pp. 17–26. (In Russ.)
7. Kur'yanova I.V., Olonina S.I., *Vestnik NGIEI*, 2017, No. 7 (74), pp. 35–44. (In Russ.)
8. Shepelova O.V., Kondrat'eva V.V., Kalemбет I.N., Voronkova T.V., Semenova M.V., Beloshapkina O.O., Seraya L.G., *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2018, No. 9 (32), pp. 70–73. (In Russ.)

9. Rakut'ko S.A., Rakut'ko E.N., *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2015, No. 38, pp. 298–304. (In Russ.)
10. Martirosyan Yu.C., Polyakova M.N., Dilovarova T.A., Kosobryuhov A.A., *Sel'skohozyajstvennaya biologiya*, 2013, No. 1, pp. 107–112. (In Russ.)
11. Nikonovich T.V., Kardis T.V., Kil'chevskij A.V., Filipenya V.L., Chizhik O.V., Trofimov Yu.V., Cvirko V.I., Kernozhickij E.V., *Vestnik Belorusskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii*, 2018, No. 1, pp. 73–78. (In Russ.)
12. Subbotin E.P., Gafickaya I.V., Nakonechnaya O.V., Zhuravlev Yu.N., Kul'chin Yu.N., *Turczaninowia*, 2018, No. 2, pp. 32–39. (In Russ.)
13. Azizov I.V., Gasyмова F.I., Ibragimova U.F., Tagieva K.R., Abdullaeva A.B., *Sciences of Europe*, 2019, No. 41, pp. 3–6.
14. Rakut'ko E.N., Vas'kin A.N., Novikov I.S., Rakut'ko S.A., *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produkcii rastenievodstva i zhivotnovodstva*, 2020, No. 1 (102), pp. 35–48. (In Russ.)
15. Yakovceva M.N., Tarakanov I.G., *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*, 2014, No. 2, pp. 177–180. (In Russ.)
16. Kahnovich L.V. *Fotosinteticheskij apparat i svetovoj rezhim* (Photosynthetic apparatus and light mode), Minsk, BGU, 1980, 142 p.
17. Karnachuk R.A., Protasova N.N., Golovackaya I.F., *Rost i ustojchivost' rastenij*, Novosibirsk, Nauka, 1988, pp. 71–75. (In Russ.)
18. Nemojkina A.L., Karnachuk R.A., *Issledovano v Rossii*, 2002, Vol. 5, pp. 1930–1937. (In Russ.)
19. Kartashov A.V., Pashkovskij P.P., Ivanov Yu.V., Ivanova A.I., Savochkin Yu.V., *Vestnik Tom. gos. un-ta. Biologiya*, 2014, No. 1 (26). (In Russ.)
20. Volotovich A.A., Kudryashova O.A., Kohnyuk A.S., Cvirko L.S., *Vestnik Polesskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2011, No. 2, pp. 24–28. (In Russ.)
21. Gud' L.A. *Lesohozyajstvennaya informaciya*, 2019, No. 2, pp. 97–102, URL: <http://lhi.vniilm.ru/> (data obrashcheniya: 13.03.2022), (In Russ.)