

## ***Выращивание салата под разными длинами волн красного светодиода (СВД)***

### **Краткий обзор:**

Светодиод представляет собой инновационный искусственный источник света с некоторыми свойствами, предназначенными для поддержки роста растений. Свойственные ему комбинации красных и синих СВД обладают большим потенциалом в его использовании в качестве источника света для того, чтобы привести к фотосинтезу благодаря своей способности вырабатывать освещение на участки максимального впитывания хлорофилла. В данной статье описана важность крайнего красного излучения и синего света, взаимодействующего с СВД с узким спектром светового излучения. В тех приведенных примерах, где растения выращивали под источниками света, в которых соотношение синего света (400-500 нм) относительно крайнего красного света (700-800 нм) было низким, наблюдалась ответная реакция, которая выражалась в удлинении или расширении листьев. Эта фотоморфогеническая реакция позволила листьям достичь критических индексов площади листа (ИПЛ), в отличие от тех растений, которые были выращены под световыми режимами с более высоким соотношением синих и крайних красных лучей. Во многих случаях, урожай салата, выращенного под СВД, был таким же продуктивным как урожай, выращенный под источником света с широким спектром, в основном, в результате более эффективного свето преграждения на ранних стадиях роста растений.

### **Введение:**

Потребность в обеспечении растительной биомассы светом—это первое препятствие на пути развития подходящей био-регенеративной системы. Будучи источником энергии для фотосинтеза, данная спектральная композиция лучей является важнейшей относительно развития растений и морфологии. Новые световые технологии должны развиваться, а существующие технологии намного увеличили эффективность преобразований электроэнергии в съедобную растительную биомассу. Несколько различных электрических и солнечных накопительных световых режимов в настоящее время анализируются разными исследователями для определения самого продуктивного, эффективного и безопасного способа подачи света растениям. Данная установка предназначена для таких растений как салат-латук, шпинат, редис, морковь и т. д. и была разработана для краткосрочных полётов в космос, и установлена на борту Международной космической станции. Благодаря определённой стратегии растения обеспечивали бы дополнительной едой и, возможно, влияли бы на психическое здоровье команды корабля. Данные, полученные при выращивании салата при помощи данных источников света, обеспечивают нас важной информацией о моделировании и развитии комплексных способов выращивания растений. СВД и другие инновационные световые технологии представляют технологии с определённым набором свойств, поддерживающий рост растений в контролируемой среде. Благодаря своему дизайну, небольшой массе и объёму, а также благодаря своему узкому спектральному входному устройству, красные и синие СВД подходят с практической точки зрения для экипировки систем, поддерживающих рост растений.

Широко распространённые популярные электрические лампы на 15-35 % эффективнее в превращении электрической энергии в свет, но подающие надежды технологии с СВД, микроволновыми лампами, солнечными коллекторами, световыми трубками, волоконно-оптическим кабелем и голографическими системами распределения имеют потенциальные возможности по улучшению эффективности. Проверка новых технологий будет включать в себя квантификационную фотосинтетически активную радиацию, исходящую от лампы, квантификационную радиоактивную производительность, а также оценочную фотосинтетическую продуктивность и выращивание растений под разными видами ламп для выявления эффективности данной системы. Оценивание и определение световых технологий способствует интеграции системы в программу, способствующую росту растений, предназначенную для космических шатлов и МКС и, в конечном счёте, в крупномасштабную

испытательную модель. Т. к. СВД представляют данные технологии, изучение их действия на растения напрямую нуждается в дальнейшем исследовании в области освещения.

### **Материалы и методы:**

Семена салата-латука и редиса были посажены, как полагается в гидропонической системе. Семя или рассада были высажены (по 3 в лунку, по 72 в желобе) прямо между 2 нейлоновыми фитильками, укрепленными на высоте 5 см от основания 0.3 м<sup>2</sup> акрилонитрипобутадиено-стироловыми (АБС) пластиковыми бочонками (52 см в ширину X 59 см в длину X 10 см в глубину). Фитильки были укреплены между двумя пластичными полиэтиленовыми полосками, продетыми через 2.5-сантиметровые отверстия в белых АБС пластиковых покрытиях желобков. Такое размещение растений предназначено для поддержания роста листьев, не допуская чрезмерного взаимозатемнения. Три засаженных желобка были размещены внутри каждой из трёх камер и присоединены к гидропонической системе. Желобки были покрыты чистым укрывочным материалом для обеспечения влажной среды для пересаженной рассады. Спустя 4 дня укрывочный материал был снят, а рассада была разрезана до 24 шт. в желобе.

Разведённый 1 к 2 питательный раствор Хогланда постоянно подавался из 18-литровых резервуаров в каждый бочонок. Каждый бочонок обладал постоянно циркулирующей гидропонической системой с четырьмя отверстиями для подачи питания (2.5 л каждый) и одной 2.5 см трубой для подачи самотёком, расположенной в центре каждого бочонка, и позволяющей наливать питательный раствор до 2,5 см глубиной (5 л питательного раствора в каждый бочонок). Во время пробных высадок было замечено повышение температуры на 5 °С. В бочонки были установлены охлаждающие змеевики для поддержания температуры питательного раствора равной температуре воздуха. В питательном растворе был использован только нитратный азот. Электронный измеритель рН постоянно показывал на мониторе и записывал уровень рН и контролировался вручную для поддержания уровня рН на 5.5-6.6. Ежедневно в 18-литровые резервуары добавлялась де-ионизированная вода, что вновь наполнить емкости, впитываемой растениями водой. При добавлении де-ионизированной воды была измерена активная проводимость раствора, которая составляла приблизительно 0.12 S m<sup>-1</sup> при добавлении концентрированного питательного раствора. Питательный раствор из каждой камеры брался на проверку каждую неделю и, таким образом, была установлена индивидуальная концентрация данного раствора при помощи спектрометрии индуктивно связанной плазмы.

### **Освещение:**

8 отдельных источников света разделили на 3 камеры. В первой камере разместили 2 лампы широкого спектра: (1) 250-W сжатый натрий (СН) (лампы высокого напряжения), и (2) охлаждающие белые флуоресцентные лампы (ОФЛ). Во второй и третьей камере были размещены охлаждающие лампы, наполненные красными и синими СВД. Все СВД были разными по отношению к разной длине выделяемых красных лучей (660, 670, 680, 690, 700 и 725 нм), в то время как все синие СВД излучали 470 нм. Все СВД имели максимальное выделение на данной длине волны равное пропускной способности 25 нм на средней высоте (диаграмма 1, страница 7). Расстояние между лампами и нижними краями бочонка было приблизительно 25 см (для всех источников света). Лампа СН была отделена от растений при 3.5 мм органическим стеклом и металлическим экраном из проволочной сетки, для ослабления действия света до необходимого фотоносинтетического фотонного потока (ФФП). Матовый белый пластиковый барьер был установлен между разными источниками света, чтобы исключить свет из смежных показателей внутри камер. Вклад синих (400-500 нм), красных (600-700 нм) и крайне красных (700-800 нм) лучей и всего ФФП был определён интегрированной пропускной полосой (таблица 1). Освещение: 18 часов - свет, 6 часов - тёмный фотопериод с приблизительно равными ФФП (в 250 молм<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>), которые являются эквивалентом суточной нормы освещения. Уровень ФФП ежедневно измеряется при помощи квантового градуированного датчика для красных СВД и спектрорадиометра. Вестибюль, прикреплённый к камерам, предотвратил попадание света в камеры.

### **Окружающая среда:**

Температура воздуха в камере с растениями и относительная влажность воздуха должны быть 22 °С и 70% соответственно. Уровень суммарного испарения ежедневно прослеживался при помощи записи количества воды, добавленной в питательный раствор для наполнения резервуаров до фиксированного уровня, а также количество добавленного питательного концентрата и кислот. Концентрация углекислоты в атмосфере высвечивалась на мониторе и контролировалась во время светлых и тёмных периодов.

### **Измерение растений:**

Начиная с 7 дня после посадки (ДПП), 6 ростков взошли на заранее заготовленных участках внутри камер, рассчитанных на рост листьев и биомассы. Всходы продолжались с недельным интервалом и окончательно все ростки взошли через 28 дней. Затем измерили диаметр ростка, поверхность/ площадь листа и массу. У самого молодого листа на данном этапе роста растения была измерена специфическая площадь листа, фотосинтез листа и его устьичная проводимость. Была установлена специальная цифровая камера, которая отображала степень светоизоляции побегов салата-латука через определённые промежутки времени. Для сравнения эффективности фотосинтеза, передаваемого данными источниками света, была высчитана биомасса ростка. Эксперимент повторяли 3-4 раза для каждой культуры. Для подсчёта индекса площади листа (ИПЛ) был использован стандартный анализ роста растений. Также был установлен уровень ассимиляции (УА) и уровень роста растения (УРР) за 7-дневный интервал времени, основанные на средних показателях. В качестве уровня значимости было взято 5% , затем данные были подвергнуты дисперсионному анализу, сопровождаемому применением метода множественного сравнения Туки.

### **Результаты и обсуждения:**

#### **Характеристики источников света:**

Спектрорадиометрические исследования источников света показали контрастное спектральное распределение между СВД узкого спектра и широкоспектральными ОФЛ и СН лампами (диаграмма 1). Среди ламп широкого спектра, длина синих волн СН была сравнительно низкой по сравнению с ОФЛ лампой. При использовании потенциометра с системой СВД Snap-lite™, синие СВД были намеренно установлены для обеспечения приблизительно 8-9 % ФФП в синем регионе (400-500) для СВД. Для получения оптимального урожая других растений под красными СВД требовалось дополнительное излучение из синего региона спектра. Предыдущие работы/ исследования показали, что минимальное количество синих лучей из разного рода ламп было достаточно для удовлетворения фотоморфогеническим требованиям. Использование лампы с недостающим количеством красных или синих лучей вызывает увеличение длины междоузлия растений, длину стебля и растяжение листа. И красные лучи, посредством фотохрома, и синие лучи, с помощью синего/ ультрафиолетового фоторецептора, являются эффективным средством стимулирования фотоморфогенических реакций. Следовательно, реакции развития растения трудно объяснить, если основываться только на дискретные измерения и на спектральные выделения синих и красных лучей. Неизвестно, являются ли фотоморфогенические реакции зависимыми или независимыми по отношению к фотохромным реакциям. Салат, выращенный под СВД с длиной волн короче 700 нм, дал такой урожай биомассы, какой дали растения, выращенные под обычными источниками света широкого спектра (флуоресцентными и СН). Это означало то, что эффективным показателем для эффективного роста редиса и салата-латука является длина волны около 700 нм, которая соответствует установленному спектру фотосинтетического поглощения радиации более высокими растениями. Результаты показали, что волны в 700 и 725 нм оказались далеко за пределами необходимой зоны для поддержки роста растений и, следовательно, не будут обсуждаться в данной работе. Данные, представленные в данной работе, сфокусированы на реакциях растений под 660, 670, 680 690 нм СВД и сравниваются с ОФЛ и СН лампами.

### **Салат-латук:**

Салат-латук, выращенный под СН лампой, дал урожай значительно больший, чем салат, выращенный под лучами ОФЛ лампы. При сравнении растений, выращенных под СВД, выяснилось, что произошло увеличение биомассы тех растений, которые были посажены в центральном секторе попадания красных лучей СВД, увеличенных с 660 до 690 нм (диаграмма 2). Количество биомассы салата-латука, выращенного под СВД в 660 или 680 нм, особенно не отличалось от количества биомассы, выращенной под СН лампой. Салат-латук, выращенный под СН лампами или СВД в 680 или 690 нм, также в равной степени показывает самый высокий индекс площади листа (диаграмма 3). Спектральные количественные данные сравниваются с данными (таблица 1), показывающими, что избыток крайнего красного излучения (или сравнительно низкое количество синих лучей, особенно в случае с СН лампами) стимулировало увеличение площади листа (диаграмма 4). Таким образом, это способствовало росту салата-латука, выращиваемого под СН лампой и СВД в 680-690 нм, что позволило достичь критической ИПЛ раньше, чем при остальных способах выращивания (ОФЛ, 660). Другие исследователи отметили более быстрый рост и увеличение длины ствола у растений, выращенных под лампами с небольшим излучением красных лучей, при сравнении с растениями, выращенными под лампами с более насыщенным синим излучением. Данные по увеличению роста листа, выражаемые процентами (диаграмма 4) показали, что салат-латук в целом, выращенный под СН лампами и 680 и СВД в 680 и 690 нм, показывал лучшие показатели роста на раннем этапе, чем салат-латук, выращенный под СВД в 660 нм или ОФЛ лампами. При сравнении растений, выращенных под СВД и красными СВД волнами, специфическая площадь листа впечатляюще увеличилась в размерах (данные не отображены на диаграмме). Большая ИПЛ облегчает характерное поглощение/ перехват радиации, которая, в свою очередь, увеличивает общий УРР, особенно на ранних стадиях цикла выращивания растений. Интересен тот факт, что растения, выращенные под СВД в 690 нм, показывали более низкий УА по сравнению с растениями, выращенными под другими источниками света, что дало основания предположить, что растения, выращенные под СВД в 690 нм, обладали пониженным уровнем обмена углерода. Эти данные пересеклись с измерениями фотосинтеза листа, производимого переносной системой измерения фотосинтеза Li-Cor 6200. Предыдущие исследования убедительно продемонстрировали, что растения с большой ИПЛ в целом были такими же или даже более продуктивными, чем растения, показавшие высокие индивидуальные фотосинтетические нормы, но с меньшей ИПЛ. Из этих примеров следует, что растения с меньшей ИПЛ не в достаточной степени поглощали падающий свет. К тому же, увеличение площади листа оказалось преобладающим УА, как фактор роста растений и урожая биомассы.

### **Редис:**

Единственным значимым различием в показателях производства общей биомассы редиса, выращенного под СВД в 690 нм, является увеличение биомассы по сравнению с тем редисом, который вырастили под другими источниками света. В целом, реакция роста у редиса была такой же, что и у салата-латука. Здесь крайне красное облучение сыграло ключевую роль. ИПЛ редиса (диаграмма 6) была наибольшей при действии крайне красного излучения и/или низкого соотношения синих и крайне красных лучей (таблица 1). ИПЛ, измеренная у редиса, выращенного под СВД в 690 нм, была значительно больше, чем у других растений, которые соответствуют данным по продукции общей биомассы (диаграмма 6). Однако УА редиса, выращенного под СВД в 690 нм, был ниже относительно УА редиса, выращенного под СВД 660 нм или ОФЛ лампами. Эти данные означают, что даже со сниженным УА или фотосинтетической способностью, большая ИПЛ может сделать растение таким же, если даже не более продуктивным, чем растение, имеющее недостаточную способность улавливания света, хотя такое растение может показывать более высокие индивидуальные фотосинтетические показатели. Появилось тесное взаимоотношение между уровнем увеличения площади листа и его роста. Следовательно, способность крайне красной радиации стимулировать увеличение площади листа—это важный фактор в определении окончательного урожая той или иной культуры.

Интересен тот факт, что спектр СВД в 660 нм или ОФЛ ламп показал наименьшее содержание крайне красной радиации, но в то же время самое высокое соотношение синих и крайне лучей по сравнению с другими световыми режимами. Так как уровень добавочной синей радиации постоянно поддерживался в системе СВД, идеальное количество синего света в сочетании с красными СВД на заданной длине волн, способствующего максимальному урожаю биомассы, всё ещё находится под вопросом. Возможно, существует минимальный пороговый уровень синего света для определённых растений, который способствует их оптимальному росту и развитию.

Кроме СВД в 690 нм, фотохромные фотостанционные величины (ФФВ) (>0.84) были близки к максимуму и составляли около 0.89, что наталкивает на мысль о том, что разница ФФВ между СВД в 690 нм и остальными приборами значительна. Более того, при помощи этих наблюдений была обнаружена функция взаимодействия синего света в сочетании с крайне красным светом. Неизвестно, являются ли фотоморфогенические реакции на синий свет взаимозависимыми или зависимыми от фотохромных реакций. Очень важно заметить, что хотя растительная биомасса, выращенная под СВД в 690 нм, была значительно больше, существенной разницы с урожаем клубневой биомассы выявлено не было.

### **Интеграция осветительных систем:**

Так как растительная масса, скорее всего, будет ограничена регулируемой средой, общая площадь, предназначенная для роста растений и увеличения длины стебля, очень важна для будущего анализа осветительных технологий. Феномен увеличения площади листа, который наблюдался под определёнными осветительными приборами, был бы «благодарным» с точки зрения максимального поглощения света на ранних стадиях роста. Это было бы несомненным преимуществом в традиционных рассадопосадочных схемах, где растения начинали исследоваться на последнем этапе перед сбором урожая. В оптимизированных продолжительных урожайных системах, рассадная сеть между растениями должна меняться, т.к. растения увеличиваются в размере, что соответственно максимизирует поглощение ими света на всех стадиях роста и независимо от источника света.

Важно отметить, что СН лампа—это лампа с точечным излучением и что она противопоставляется ОФЛ лампам и СВД, которые давали, по сути, более рассеянный свет благодаря своему дизайну и взаимодействию осветительных приборов. В отличие от «рассеянной» природы ОФЛ ламп и СВД, растения, выращенные под СН лампами, испытывали неравномерную световую интенсивность, особенно те, что находились под самой лампой, несмотря на усилия равномерного распределения света через экран. Лучшее распределение света, возможно, может быть достигнуто размещением ламп на большем расстоянии от растений. Однако в исследованиях часто определяют лимит удаления лампы от растений. Растения, любящие простор, также выращиваются под лампами, закреплёнными максимально низко над ними. Поэтому существует необходимость дальнейшего разработки материалов, необходимых для эффективного и равномерного распределения света над растениями. Современные исследования в этой области включают себя исследования сфокусированных зеркал, призматических отражающих плёнок, голографических диффузионных аппаратов и светопроводов в сочетании с инновационными световыми технологиями.

В данном исследовании акцент делается на те сложности, с которыми столкнулись учёные при попытке использования электрической энергии для производства биомассы. Например, СН лампа 250-W была, вероятно, увеличена в размерах для нашего эксперимента. Как только лампы удалили на расстояние в 25 см от верхних листьев побегов, появилась необходимость использовать экран для притупления уровня ФФП до стандартного уровня в 250 ФФП единиц. В этом случае было бы несправедливо брать в расчёт только 250-W, т.к. большое количество света было поглощено экранами. Однако важно заметить, что было установлено, что увеличение урожая зависело от увеличения уровня ФФП, происходящего за счёт использования ФФП продуктивности. В энергетически более продуктивных подходах будут использованы лампы малой мощности (например, 80-W СН лампы) без экранов или же будут использованы эффективные реостаты для регулирования силы света лампы, которые, возможно, будут беречь энергию.

Другая сложность состоит в дизайне осветительного прибора. Если конфигурации светильников не оптимизированы под данное расстояние, могут возникнуть случаи неэффективного распределения света. В конечном счете, для расчётов биомассы, производимой посредством  $W$  электроэнергии, в другом подходе была попытка экстраполировать скрытые издержки, чтобы достичь необходимого уровня ФФП. Однако такой подход также оказался осложнён тем фактом, что люмены являются фотометрическими единицами (по отношению к чувствительному визуальному восприятию человека).

**Выводы:**

Для растений типа салата рационально использовать падающее облучение, большее количество радиации должно быть перехвачено и поглощено полисинтетической тканью. Было установлено, что под СН лампами и СВД в 680 и 690 нм растения достигают критической ИПЛ ещё на ранних стадиях развития, что способствует оптимальному фотосинтезу. Поэтому можно предсказать, что красные волны в 680-690 нм были бы самым хорошим выбором среди всех сравниваемых в данном исследовании СВД. Возможно, использование СВД в лампах широкого спектра приведёт к увеличению площади листа. Исторически, большое количество издаваемых исследований, рассматривающих фотоморфогеническую реакцию, главным образом, на соотношение красных и крайне красных лучей, делают заключения о роли фотохрома, но оказывается, ультрафиолетовые рецепторы и рецепторы синего света играют важную роль в росте и развитии данных культур.

Далее перевод на страницах 7, 8, 9 данного исследования.

## Улучшение роста шпината, редиса и салата-латука под СВД с добавлением синего света

Краткий обзор: Редис (Cherriette- Шерриетт), салат-латук (Waldmann's green- Уолдманз Грин) и шпинат (Nordic IV- Нордик 4) были выращены под красными СВД в 660 нм и урожай этих культур был сравнен с ФФП растений, выращенных либо под белыми флуоресцентными лампами холодного света, либо под красными СВД с 10 % добавлением синего света (400-500 нм) от синих флуоресцентных ламп (СФЛ). На 21 день после посадки (ДПП) уровень фотосинтеза и устьичная проводимость листа были больше у растений, выращенных под ОФЛ, чем у тех, что были выращены под красными СВД с или без добавления синего света. Общая сухая масса урожая была значительно ниже у всех типов протестированных растений, выращенных только под красными СВД, чем у тех, что были выращены под ОФЛ или под красными СВД+ 10% СФЛ. Более того, сухая масса редиса и шпината, выращенных под красными СВД+ 10% СФЛ, была значительно ниже массы растений, выращенных под ОФЛ. Из этого можно сделать вывод, что добавление синего света к красным СВД было недостаточным для достижения максимального роста этих растений.

Исследования растений, обеспечивающих нас пищей, атмосферного обновления, очистка воды и утилизация отходов долгое время были в центре внимания NASA в связи с их проектом поддержания жизнедеятельности. Контроль и снабжение достаточным количеством и качеством света будет значительным вызовом для растений, растущих на борту космических кораблей. СВД—это подающие надежды источники света для обеспечения света растениям, произрастающим в специальных камерах, из-за их небольшой массы и объёма, твёрдотельной конструкции, хорошая степень сохранности и долговечность. Электрическая эффективность красных СВД на галлиево-алюминиевом арсениде (ГАА) по сообщениям гораздо больше, чем у флуоресцентных ламп и по сравнению с натриевыми лампами высокого давления. Общедоступные красные СВД излучают узкий световой спектр (660 нм с полосой частот в 25 нм на средней высоте), что соответствует максимальному поглощению хлорофилла.

Несмотря на то, что у красных СВД имеется большой потенциал при использовании их в качестве источника света привести к фотосинтезу, растения приспособлены к использованию широкого светового спектра для контроля фотоморфогенезиса. Предыдущие исследования показывают, что минимальное количество синего света в широком спектре необходимо для нормального роста растений и морфологии. Эта потребность в синем свете—видоспецифическая реакция растений. Тесты с добавлением синего флуоресцентного света (СФС) света к узкой полосе частот красных СВД (660 нм) подтверждают выводы относительно ламп широкого спектра. Несмотря на возросшую популярность красных СВД как источников радиации для растений, доступна информация только о некоторых видах растений, в которой напрямую сравниваются рост растений и урожай, достигнутые под действием красных СВД (с и без добавления синего света) и под лампами широкого спектра. Следовательно, цель исследования была изучить рост, развитие и разделение съедобной биомассы трёх салатных культур (салат-латук, шпинат и редис), выращенных под красными СВД с и без добавления синего флуоресцентного освещения для определения эффективности этих источников света. Испытания данных растительных культур, выращенных под СВД, также удовлетворяют целям NASA использовать СВД в качестве источника радиации на космических кораблях. Насколько нам известно, реакции шпината и редиса на СВД не исследовались. Салат-латук был протестирован для определения реакции посевов на синий свет.

---

Доклад поступил в печать 13 декабря 1999. Принят к печати 1 сентября 2000. Это исследование проводилось при поддержке NASA (контракт NAS10-12180). Мы благодарим Cheryl L. Mackowiak и Lisa M. Ruffe за садоводческое содействие при проведении этих исследований и Tracy A. O. Dougher за критические замечания. Quantum Devices Inc. Обладает патентом (№ 5.012.609) на светодиоды, используемые в качестве источников света для роста растений.

Таблица 1 (стр. 380) Измерения фотосинтетического фотонного потока (ФФП), интеграция красной и синей полосы частот фотонного потока прибыли (ФПП) для ОФЛ, красные СВД (660нм) + 10% синего флуоресцентного света (красного + СФ) и для красных СВД.

(см. таблицу на стр. 380)

После таблицы: Величины интеграции красной и синей полосы частот фотонных потоков ОФЛ и красных СВД были вычислены из спектрометрических данных.

Общий ФФП для всех измерений и величины красных и синих фотонных потоков для красных + СФ представляют собой еженедельные измерения, взятые с верхушек растений.

Общий ФФП для красных СВД и красного фотонного потока были установлены при помощи кванторного датчика спектрометра.

Величины ФПП были вычислены из соответствующих количественных данных по эффективности и уровня пропускной способности в 350-750 нм, установленных McCree.

### **Материалы и методы:**

*Культурные условия.* Все растения были выращены гидропонически с использованием питательных технологий с разбавленным пополам раствором Хоагланда. Редис и салат-латук были засеяны сухими зёрнами между двумя нейлоновыми конструкциями, закреплёнными над желобами. Зерна шпината выращивались при температуре в 4°C на влажной бумаге в течение 7 дней, а проросшие зерна были высажены также как и редис и салат-латук. Каждый пластиковый желобок (10 см шириной на 35 см длиной) вмещал по три растения, высаженные на расстоянии 12 см друг от друга (эффективная концентрация растений—75 растений на м<sup>2</sup>). Каждая установка состояла из 3 отдельных желобов, расположенных на расстоянии 2 см друг от друга (по 9 растений в установке), которые были оснащены общим для всех 10-литровым резервуаром с питательным раствором. При суммарное испарение потеря воды в резервуарах восполнялось ежедневно, путём добавления деонизированной воды в питательный раствор. Электропроводимость питательного раствора была достигнута на  $\approx 1200 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$  путём добавления концентрированного питательного раствора Хоагланда. pH питательного раствора постоянно показывался на мониторе и был достигнут отметки 5.8 при добавлении 0.1 м HNO<sub>3</sub>. Температура воздуха, относительная влажность и уровень CO<sub>2</sub> были достигнуты при 23 °C, 65% и 1200  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  соответственно.

*Освещение.* Каждый осветительный прибор был помещён внутрь разделённых камер, находящихся под наблюдением для минимизации спектральной интерференции между установками. Все растения были выращены в течение 21 дня при помощи ФФП, достигнувшего приблизительно 300  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . Уровни ФФП были измерены квантовым датчиком спектрометра, для предоставления точных данных о СВД. Средний экспериментальный ФФП и ФПП были рассчитаны для каждого осветительного прибора. Фотопериод в 18 часов света/ 6 часов темноты применялся по отношению к редису и салату-латуку, а для шпината 12 часов света/ 12 часов темноты. Спектральные распределения трёх осветительных приборов показаны на диаграмме 1 (стр. 381). В случае красных СВД, растения выращивались под лучами, оснащёнными дискретными красными галиоалюминиевоарсенидовыми (GaAlAs) СВД. (диаграмма 1, А). В случае красных с добавлением синих лучей осветительных приборов, синие флуоресцентные лампы (20-W F20 T 12/ BB; Philips Lightning Co., Somerset N. J.) заменили  $\approx 10\%$  (диаграмма 1, В) общего ФФП. Контрольные растения были выращены под лампами широкого спектра (диаграмма 1, С; VHO охлаждающие белые флуоресцентные лампы), которые дали ок.  $\approx 16\%$  (48  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  ФФП) в синем регионе спектра (400-500 нм).

*Измерения растений.* На 21 день после посадки (ДПП) и через 2 часа после начала фотопериода, фотосинтез листа и устьичная проводимость были измерены при помощи переносного фотосинтетического счётчика (модель LI-6200, LI-COR) и статичного порометра? (модель LI-1600, LI-COR) соответственно. Пробы на хлорофилл были взяты с тех же листьев, на которых измерялись фотосинтез листа и проводимость, и были проанализированы при помощи метода Wintermans и De Mots (1965). Урожай был собран на 21 день после посадки и разделён на 3 группы: 1. листья, черешки и стебли; 2. корни и 3. корни, предназначенные для хранения (редис). Ткани 1 группы были высушены при 70 °C в течение 72 часов для



определения сухой массы (СМ). Каждый эксперимент проводился один раз, и измерения роста представляют собой состояние 18 растений. Уровень фотосинтеза листа и устьичной проводимости передают состояние 6 листов. Все данные были проанализированы ANOVA (SPSS для Windows, версия 6.1.3) и при помощи процедуры сравнения Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

### **Результаты и обсуждения:**

Для каждой культуры сухая масса (побег, корень или корень, предназначенные для хранения) была ниже у тех растений, которые были выращены под красными СВД по сравнению с теми, что были выращены под красными СВД + 10 % СФ светом или ОФЛ светом (диаграмма 2, стр. 382). На СМ побегов салата-латука красные СВД + 10 % СФ светом не оказали значительного влияния, показывая тем самым, что хорошему росту салата-латука могут способствовать только красные и синие фотоны. Vula R.J. и другие исследователи Мичигана предоставили похожие результаты по салату-латуку, когда в ходе их экспериментов растения были также выращены при помощи красных СВД + 10 % СФ светом. Некоторые исследователи утверждают, что минимальное количество синего света ( $\approx 30 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) необходимо для нормального развития ряда культур, что, в основном, соответствует нашим результатам для салата-латука.

Сухая масса редиса и шпината значительно увеличилась, когда к красным СВД добавили синий свет, однако растения, выращенные под белым ОФЛ светом, показали наибольшую продуктивность СМ (диаграмма 2, стр. 382), доказывая тем самым, что этим культурам требуются большее количество синих фотонов, чем салату-латуку. В качестве альтернативы, красному + 10% СФ освещению может недоставать некоторых длин волн, необходимых для оптимального роста растений. Недостаток значительного корневого развития у редиса, выращенного под красными СВД в наших тестах, согласуется с предыдущими наблюдениями редиса, выращенного под красным светом без добавления синего.

Ноенеске и другие исследователи сообщили, что пролонгация гипокотыля (подсемядольное колено, часть стебля у проростков растений) салата-латука под  $24 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  синим светом (400-500 нм) ОФЛ лампы широкого спектра была равна пролонгации гипокотыля под  $\approx 35 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  синим светом от синей флуоресцентной лампы. Эта реакция роста говорит о том, что разница, наблюдаемая между осветительными приборами, может быть результатом разных сил воздействия на поглощающие синий свет пигменты, а также наличием немногим большего количества ультрафиолетовой радиации и других длин не синих волн от ОФЛ лампы. На самом деле, спектр ламп, используемых в нашем исследовании, значительно варьируется относительно не синих волн (диаграмма 1, стр. 381). Senger предположил, что ультрафиолетовый свет может быть таким же эффективным, как и синий в некоторых случаях. Также небольшое количество крайне красной радиации ОФЛ ламп могло бы способствовать появлению реакций путём воздействия фотохромом. Однако ОФЛ лампы в наших исследованиях выделяли  $48 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  синего света, т.е. больше минимально необходимого количества; таким образом, дальнейшее увеличение синего света было бы нежелательно.

В своих исследованиях с салатом-латуком, выращенным под профильтрованными лампами для ограничения количества синего света, Dougher и Bugbee предоставили данные о том, что наблюдалось снижение роста растений под металлическими галогенидными лампами по сравнению с натриевыми лампами высокого давления, несмотря на то, что доли синего света и фотохромного фотостата? были идентичны. Они сделали вывод, что несиние волны от металлических галогенидных ламп, а особенно в спектре 570-610 нм, были включены в реакцию, и тем самым, затруднив истолкование эффективности синего света, исходящего от различных источников радиации или ламп. Тесты с красными и синими СВД с разными пиковыми длинами волн были бы полезны для выяснения реакции синего света. Эти данные могли бы быть использованы для разработки сбалансированных систем СВД, предназначенных для поддержки роста растений.

Фотонный поток прибыли (ФПП) был использован в качестве инструмента для объяснения накопления биомассы, т.к. фотоны взвешиваются в соответствии с их относительной эффективностью для фотосинтеза. Использование ФПП для описания накопления СМ было продемонстрировано на пшенице и сое, а не на салате-латуке,

выращенном под лампами широкого спектра с разными долями синего света. В наших тестах уровень ФФП поддерживался на отметке ок.  $300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  ФФП, а уровень ФПП был одинаковым для всех источников света (таблица 1, стр. 380). Из-за того, что красные фотоны фотосинтетически наиболее эффективные, уровень ФПП был наивысшим в случае с красными СВД, однако накопление СМ у всех растений, выращенных под красными СВД, было ниже, чем у растений, выращенных под ОФЛ и красными + СФ лампами (диаграмма 2, стр. 382). Это говорит о том, что использование ФПП для сравнения роста растений не надёжны.

Уровни фотосинтеза для редиса и устичной проводимости салата-латука оказались у тех растений, которые были выращены под красными СВД, по сравнению с растениями, выращенными либо под ОФЛ (контроль), либо под красными лампами с добавлением СФ (таблица 2, стр. 382). Низкие уровни фотосинтеза листьев можно отнести сниженной устичной проводимости, т.к. устья больше контролируются синим, чем красным светом. Однако эти исследования не касаются посевов редиса и салата-латука. Хотя уровень устичной проводимости была понижена у салата-латука, выращенного под красными СВД, межклеточные уровни  $\text{CO}_2$  и  $P_n$  (фотосинтез) были одинаковыми во всех случаях, обозначая то, что углеродная ассимиляция была не тронута устичной смычкой. Сокращение уровня  $P_n$  у редиса, выращенного под красными СВД, могло возникнуть вследствие уменьшения содержания хлорофилла или вследствие других реакций на недостаток синего света. Хотя сокращение накопления СМ было одинаковым для всех культур, выращенных под красными СВД, только у редиса наблюдалось снижение уровня  $P_n$ ; таким образом, уровни ассимиляции  $\text{CO}_2$  в листьях не могут полностью объяснить эти эффекты. Изменения в уровне хлорофилла также не связаны с уровнем  $P_n$  у шпината, выращенного под красными СВД (таблица 2, стр. 382). Возможное объяснение несоответствия уровня  $P_n$  и накопления СМ может лежать в измерении  $P_n$  в наших исследованиях. Измерения дневного уровня  $P_n$  и дыхания листьев или целого растения в темноте были бы полезны для определения доли углерода в растениях, выращенных под красными СВД.

Эти исследования подтверждают точку зрения, согласно которой один красный свет неприемлем для хорошего роста посевов салата-латука, редиса и шпината. Добавление синего света ( $\approx 30 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) в 400-500 нм к красным СВД намного увеличивает рост растений, хотя такой свет и не так хорош для шпината и редиса, как дневной свет. Развитие и тестирование узкополосных синих СВД должно обеспечить нас полезной информацией об эффектах, производимых синим светом на рост растений, также как и об осуществимости использования данных технологий для выращивания растений в регулируемой среде.