

habr.com

Освещение растений белыми светодиодами

Антон

19-27 минут

Интенсивность фотосинтеза под красным светом максимальна, но под одним только красным растения гибнут либо их развитие нарушается. Например, корейские исследователи [1] показали, что при освещении чистым красным масса выращенного салата больше, чем при освещении сочетанием красного и синего, но в листьях значимо меньше хлорофилла, полифенолов и антиоксидантов. А биофак МГУ [2] установил, что в листьях китайской капусты под узкополосным красным и синим светом (по сравнению с освещением натриевой лампой) снижается синтез сахаров, угнетается рост и не происходит цветения.



Рис.1 Леанна Гарфилд, *Tech Insider* — *Aerofarms*

Какое нужно освещение, чтобы при умеренном энергопотреблении получить полноценно развитое, большое, ароматное и вкусное растение?

В чем оценивать энергетическую эффективность светильника?

Основные метрики оценки энергетической эффективности фитосвета:

- *Photosynthetic Photon Flux (PPF)*, в микромолях на джоуль, т. е. в числе квантов света в диапазоне 400–700 нм, которые излучил светильник, потребивший 1 Дж электроэнергии.
- *Yield Photon Flux (YPF)*, в эффективных микромолях на джоуль, т. е. в числе квантов на 1 Дж электроэнергии, с учетом множителя — кривой *McCree*.

PPF всегда получается немного выше, чем *YPF* (кривая *McCree* нормирована на единицу и в большей части диапазона меньше единицы), поэтому первую метрику

выгодно использовать продавцам светильников. Вторую метрику выгоднее использовать покупателям, так как она более адекватно оценивает энергетическую эффективность.

Эффективность ДНаТ

Крупные агрохозяйства с огромным опытом, считающие деньги, до сих пор используют натриевые светильники. Да, они охотно соглашаются повесить над опытными грядками предоставляемые им светодиодные светильники, но не согласны за них платить.

Из рис. 2 видно, что эффективность натриевого светильника сильно зависит от мощности и достигает максимума при 600 Вт. Характерное оптимистичное значение YPF для натриевого светильника 600–1000 Вт составляет 1,5 эфф. мкмоль/Дж. Натриевые светильники 70–150 Вт имеют в полтора раза меньшую эффективность.

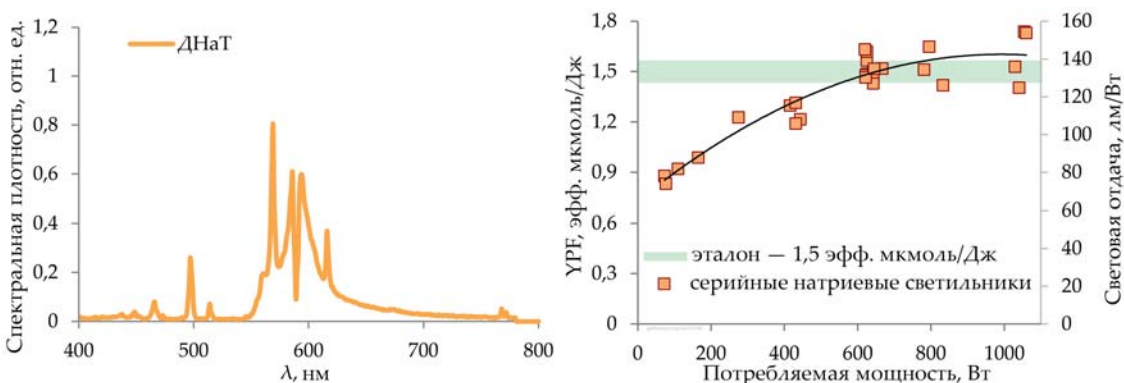


Рис. 2. Типичный спектр натриевой лампы для растений (слева). Эффективность в люменах на ватт и в эффективных микромолях серийных натриевых светильников для теплиц марок *Cavita*, *E-Papillon*, «Галад» и «Рефлекс» (справа)

Любой светодиодный светильник, имеющий эффективность 1,5 эфф. мкмоль/Вт и приемлемую цену, можно считать достойной заменой натриевого светильника.

Сомнительная эффективность красно-синих фитосветильников

В этой статье не приводим спектров поглощения хлорофилла потому, что сослаться на них в обсуждении использования светового потока живым растением некорректно. Хлорофилл *invitro*, выделенный и очищенный, действительно поглощает только красный и синий свет. В живой клетке пигменты поглощают свет во всем диапазоне 400–700 нм и передают его энергию хлорофиллу. Энергетическая эффективность света в листе определяется кривой «*McCree 1972*» (рис. 3).

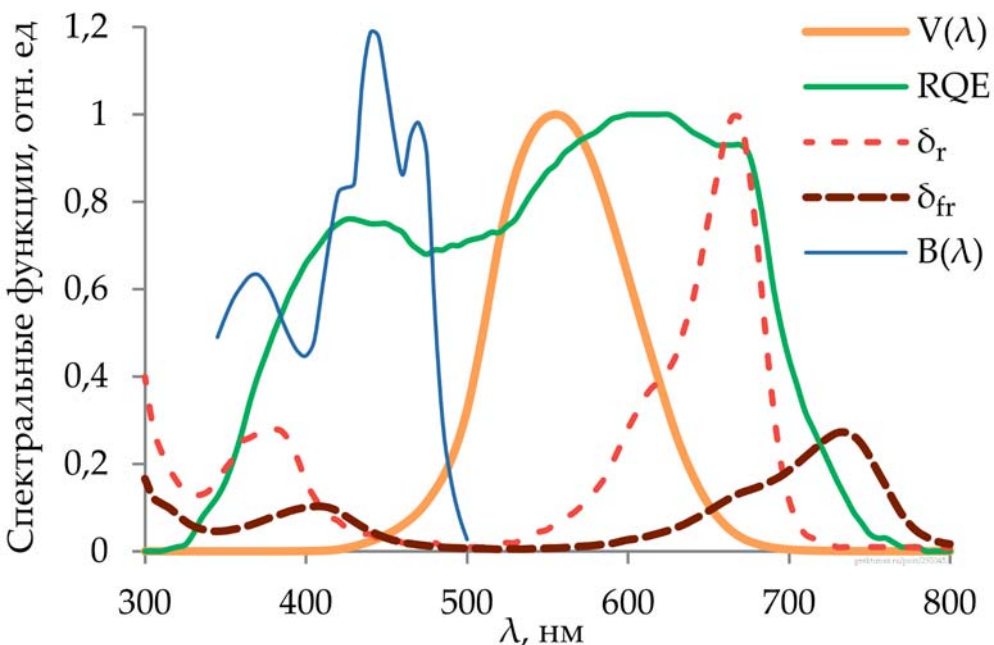


Рис. 3. $V(\lambda)$ — кривая видности для человека; RQE — относительная квантовая эффективность для растения (McCree 1972); σ_r и σ_{fr} — кривые поглощения фитохромом красного и дальнего красного света; $B(\lambda)$ — фототропическая эффективность синего света [3]

Отметим: максимальная эффективность в красном диапазоне раза в полтора выше, чем минимальная — в зеленом. А если усреднить эффективность по сколько-нибудь широкой полосе, разница станет еще менее

заметной. На практике перераспределение части энергии из красного диапазона в зеленый энергетическую функцию света иногда, наоборот, усиливает. Зеленый свет проходит через толщу листьев на нижние ярусы, эффективная листовая площадь растения резко увеличивается, и урожайность, например, салата повышается [2].

Освещение растений белыми светодиодами

Энергетическая целесообразность освещения растений распространенными светодиодными светильниками белого света исследована в работе [3].

Характерная форма спектра белого светодиода определяется:

- балансом коротких и длинных волн, коррелирующим с цветовой температурой (рис. 4, слева);
- степенью заполненности спектра, коррелирующей с цветопередачей (рис. 4, справа).

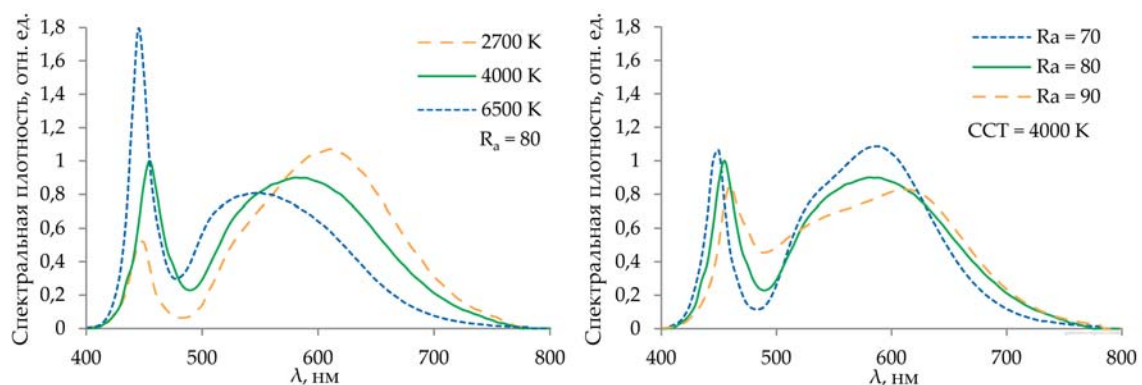


Рис. 4. Спектры белого светодиодного света с одной цветопередачей, но разной цветовой температурой КЦТ (слева) и с одной цветовой температурой и разной цветопередачей R_a (справа)

Различия в спектре белых диодов с одной цветопередачей и одной цветовой температуры едва уловимы.

Следовательно, мы можем оценивать спектрзависимые

параметры всего лишь по цветовой температуре, цветопередаче и световой эффективности — параметрам, которые написаны у обычного светильника белого света на этикетке.

Результаты анализа спектров серийных белых светодиодов следующие:

1. В спектре всех белых светодиодов даже с низкой цветовой температурой и с максимальной цветопередачей, как и у натриевых ламп, крайне мало дальнего красного (рис. 5).

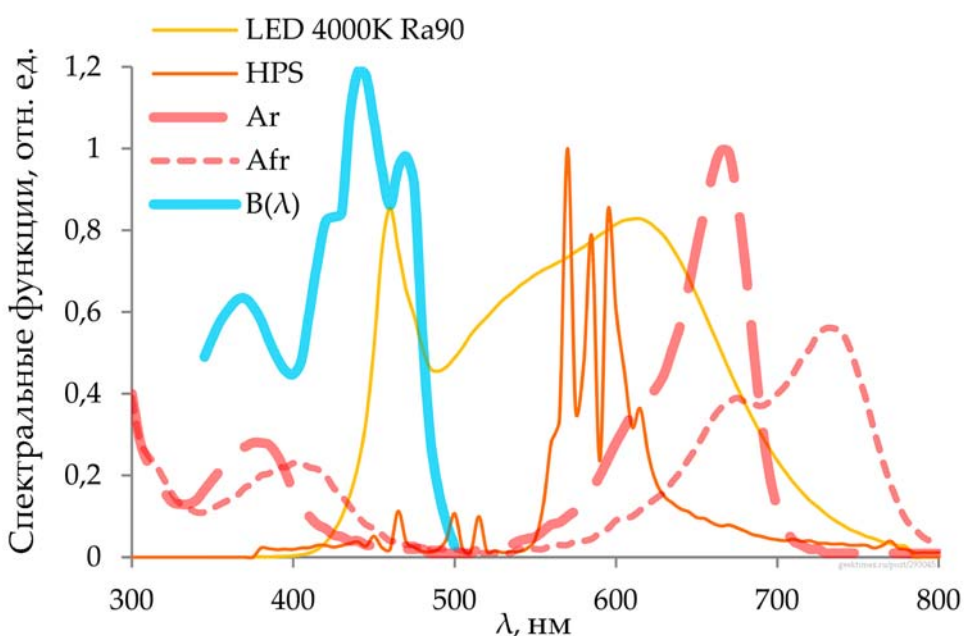


Рис. 5. Спектр белого светодиодного ($LED\ 4000K\ R_a = 90$) и натриевого света (HPS) в сравнении со спектральными функциями восприимчивости растения к синему (B), красному (A_r) и дальнему красному свету (A_{fr})

В естественных условиях затененное пологом чужой листвы растение получает больше дальнего красного, чем ближнего, что у светолюбивых растений запускает «синдром избегания тени» — растение тянется вверх. Помидорам, например, на этапе роста (не рассады!) дальний красный необходим, чтобы вытянуться, увеличить рост и общую

занимаемую площадь, а следовательно, и урожай в дальнейшем.

Соответственно, под белыми светодиодами и под натриевым светом растение чувствует себя как под открытым солнцем и вверх не тянется.

2. Синий свет нужен для реакции «слежение за солнцем» (рис. 6).



Рис. 6. Фототропизм — разворот листьев и цветов, вытягивание стеблей на синюю компоненту белого света (иллюстрация из «Википедии»)

В одном ватте потока белого светодиодного света 2700 К фитоактивной синей компоненты вдвое больше, чем в одном ватте натриевого света. Причем доля фитоактивного синего в белом свете растет пропорционально цветовой температуре. Если нужно, например, декоративные цветы развернуть в сторону людей, их следует подсветить с этой стороны интенсивным холодным светом, и растения

развернутся.

3. Энергетическая ценность света определяется цветовой температурой и цветопередачей и с точностью 5 % может быть определена по формуле:

$$Y_{PF} = \frac{\eta}{100} \cdot \left[1,15 + \frac{35 \cdot Ra - 2360}{CCT} \right] \text{ э ф ф . м к м о л ь / Д ж ,}$$

где η — световая отдача в лм/Вт, Ra — общий индекс цветопередачи, CCT — коррелированная цветовая температура в градусах Кельвина.

Примеры использования этой формулы:

А. Оценим для основных значений параметров белого света, какова должна быть освещенность, чтобы при заданной цветопередаче и цветовой температуре обеспечить, например, 300 эфф. мкмоль/с/м²:

Освещенность светодиодным белым светом в килолюксах, соответствующая 300 эфф. мкмоль/с/м ²			
CRI \ КЦТ	3000 К	4000 К	5000 К
Ra = 70	25 клк	26 клк	26 клк
Ra = 80	23 клк	24 клк	24 клк
Ra = 90	21 клк	22 клк	23 клк
Ra = 95	20 клк	22 клк	22 клк

Видно, что применение теплого белого света высокой цветопередачи позволяет использовать несколько меньшие освещенности. Но если учесть, что световая отдача светодиодов теплого света с высокой цветопередачей несколько ниже, становится понятно, что подбором цветовой температуры и цветопередачи нельзя энергетически значимо выиграть или проиграть. Можно лишь скорректировать долю фитоактивного синего или красного света.

Б. Оценим применимость типичного светодиодного светильника общего назначения для выращивания микрозелени.

Пусть светильник размером $0,6 \times 0,6$ м потребляет 35 Вт, имеет цветовую температуру 4000 К, цветопередачу $Ra = 80$ и световую отдачу 120 лм/Вт. Тогда его эффективность составит $YPF = (120/100) \cdot (1,15 + (35 \cdot 80 - 2360)/4000)$ эфф. мкмоль/Дж = 1,5 эфф. мкмоль/Дж. Что при умножении на потребляемые 35 Вт составит 52,5 эфф. мкмоль/с.

Если такой светильник опустить достаточно низко над грядкой микрозелени площадью $0,6 \times 0,6$ м = $0,36$ м² и тем самым избежать потерь света в стороны, плотность освещения составит $52,5$ эфф. мкмоль/с / $0,36$ м² = 145 эфф. мкмоль/с/м². Это примерно вдвое меньше обычно рекомендуемых значений. Следовательно, мощность светильника необходимо также увеличить вдвое.

Прямое сравнение фитопараметров светильников разных типов

Сравним фитопараметры обычного офисного потолочного светодиодного светильника, произведенного в 2016 году, со специализированными фитосветильниками (рис. 7).

	Светильник для теплиц с лампой ДНаЗ ЖСП55-600-002	Светодиодный фитосветильник красно-синего света, 2017 г. в.	Светильник светодиодный для общественных помещений 600 × 600 мм белого света, 2016 г. в.	
			с рассеивателем	без рассеивателя
Мощность потребляемая	622 Вт	111,8 Вт	34,9 Вт	
Световой поток	211,74 Вт	30,07 Вт	11,06 Вт	13,19 Вт
КПД	34 %	26,9 %	31,7 %	37,8 %
Световой поток	81700 лм	4117 лм	3542 лм	4222 лм
Световая отдача	131,3 лм/Вт	36,8 лм/Вт	101,5 лм/Вт	121,0 лм/Вт
КЦТ	2158 К	3864 К	4135 К	
CRI	$Ra = 20,1$	$Ra = 32$	$Ra = 82$	
BlueEq	100 %	877 %	396 %	
PPF	971,9 мкмоль/с	136,2 мкмоль/с	50,1 мкмоль/с	59,7 мкмоль/с

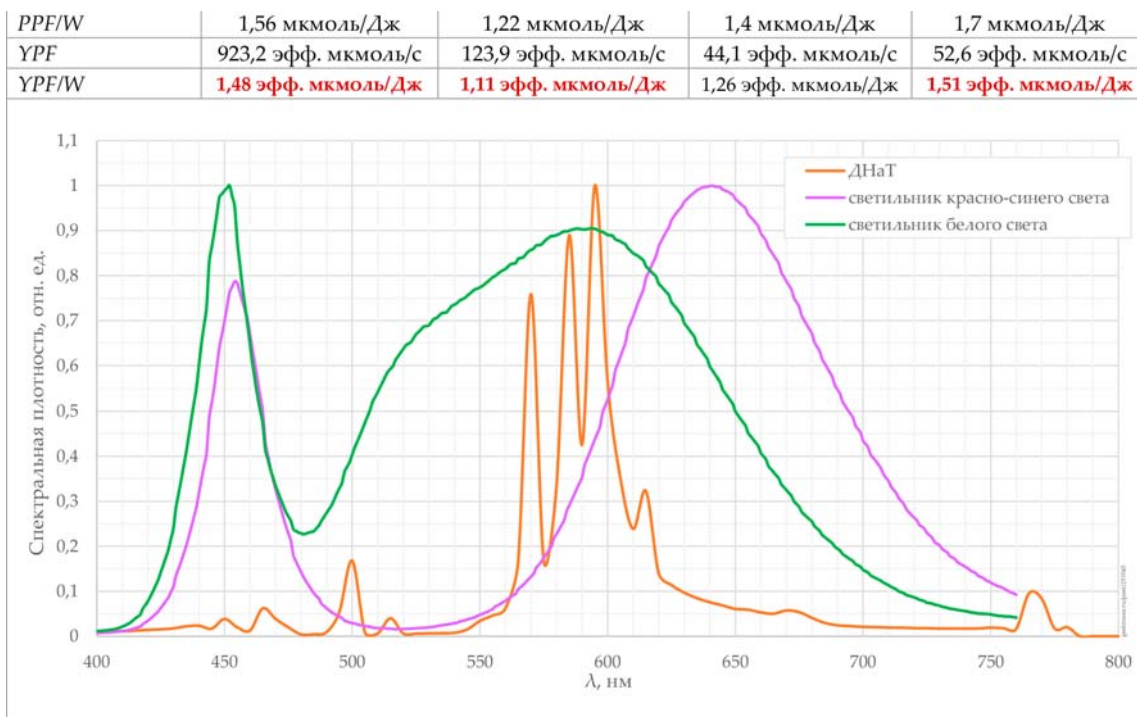


Рис. 7. Сравнительные параметры типичного натриевого светильника 600Вт для теплиц, специализированного светодиодного фитосветильника и светильника для общего освещения помещений

Видно, что обычный светильник общего освещения со снятым рассеивателем при освещении растений по энергетической эффективности не уступает специализированной натриевой лампе. Видно также, что фитосветильник красно-синего света (производитель намеренно не назван) сделан на более низком технологическом уровне, раз его полный КПД (отношение мощности светового потока в ваттах к мощности, потребляемой из сети) уступает КПД офисного светильника. Но если бы КПД красно-синего и белого светильников были одинаковы, то фитопараметры тоже были бы примерно одинаковы!

Также по спектрам видно, что красно-синий фитосветильник не узкополосен, его красный горб широк и содержит гораздо больше дальнего красного, чем у белого светодиодного и

натриевого светильника. В тех случаях, когда дальний красный необходим, использование такого светильника как единственного или в комбинации с другими вариантами может быть целесообразно.

Оценка энергетической эффективности осветительной системы в целом:

Автор использует ручной спектрометр [UPRtek 350N](#) (рис. 8), предоставленный компанией «Интех инжиниринг».

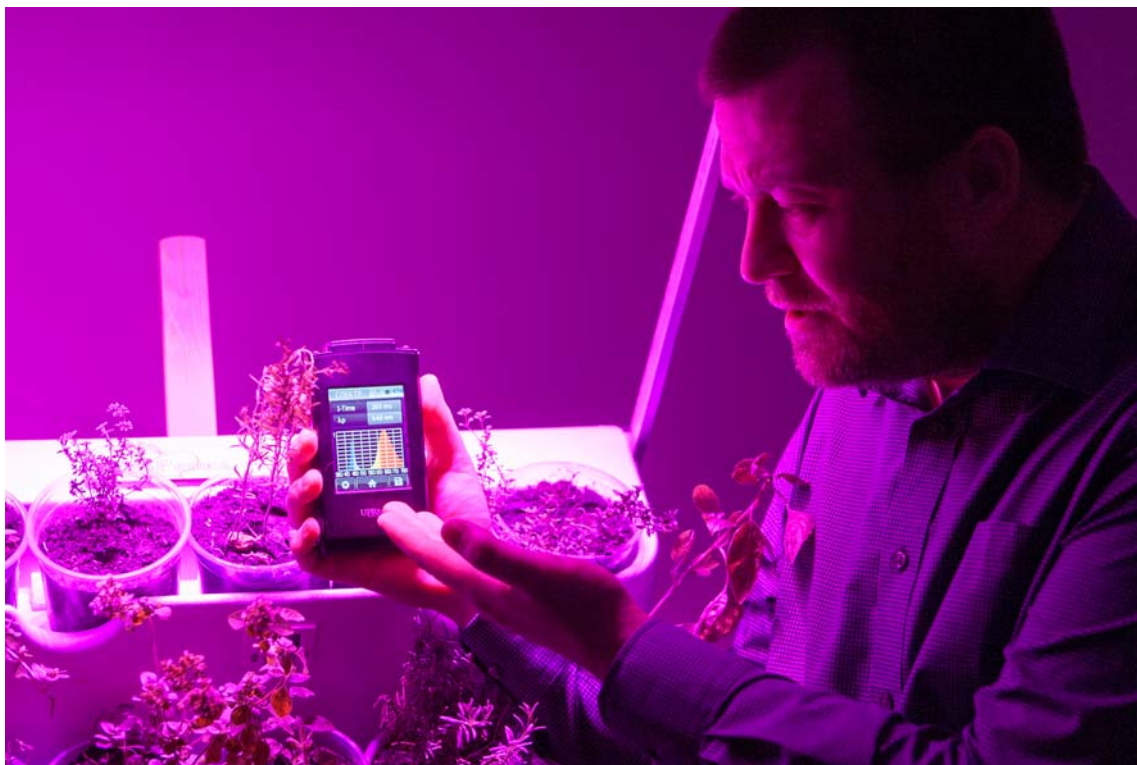


Рис. 8. Аудит системы фитоосвещения

Следующая модель *UPRtek* — спектрометр *PG100N* по заявлению производителя измеряет микромоли на квадратный метр, и, что важнее, световой поток в ваттах на квадратный метр.

Измерять световой поток в ваттах — превосходная функция! Если умножить освещаемую площадь на плотность светового потока в ваттах и сравнить с потреблением светильника, станет ясен энергетический КПД осветительной системы. А это единственный на сегодня

беспорный критерий эффективности, на практике для разных осветительных систем различающийся на порядок (а не в разы или тем более на проценты, как меняется энергетический эффект при изменении формы спектра).

Примеры использования белого света

Описаны примеры освещения гидропонных ферм и красно-синим, и белым светом (рис. 9).



Рис. 9. Слева направо и сверху вниз фермы: *Fujitsu*, *Sharp*, *Toshiba*, ферма по выращиванию лекарственных растений в Южной Калифорнии

Достаточно известна система ферм *Aerofarms* (рис. 1, 10), самая большая из которых построена рядом с Нью-Йорком. Под белыми светодиодными лампами в *Aerofarms* выращивают более 250 видов зелени, снимая свыше двадцати урожаев в год.

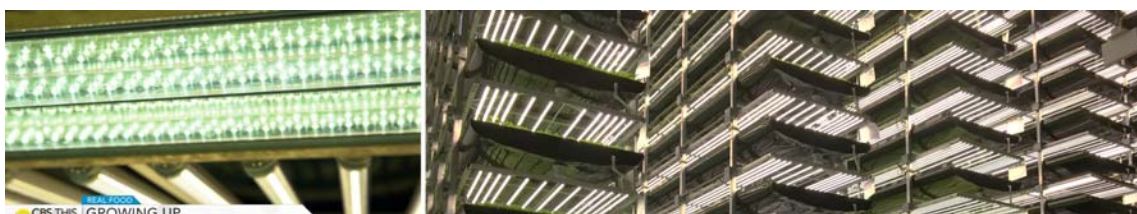




Рис. 10. Ферма Aerofarms в Нью-Джерси («Штат садов») на границе с Нью-Йорком

Прямые эксперименты по сравнению белого и красно-синего светодиодного освещения

Опубликованных результатов прямых экспериментов по сравнению растений, выращенных под белыми и красно-синими светодиодами, крайне мало. Например, мельком такой результат показала МСХА им. Тимирязева (рис. 11).



Рис. 11. В каждой паре растение слева выращено под белыми светодиодами, справа — под красно-синими (из [презентации](#) И. Г. Тараканова, кафедра физиологии растений МСХА им. Тимирязева)

Пекинский университет авиации и космонавтики в 2014 году опубликовал результаты большого исследования пшеницы, выращенной под светодиодами разных типов [4]. Китайские исследователи сделали вывод, что целесообразно использовать смесь белого и красного света. Но если посмотреть на цифровые данные из статьи (рис. 12), замечаешь, что разница параметров при разных типах освещения отнюдь не радикальна.

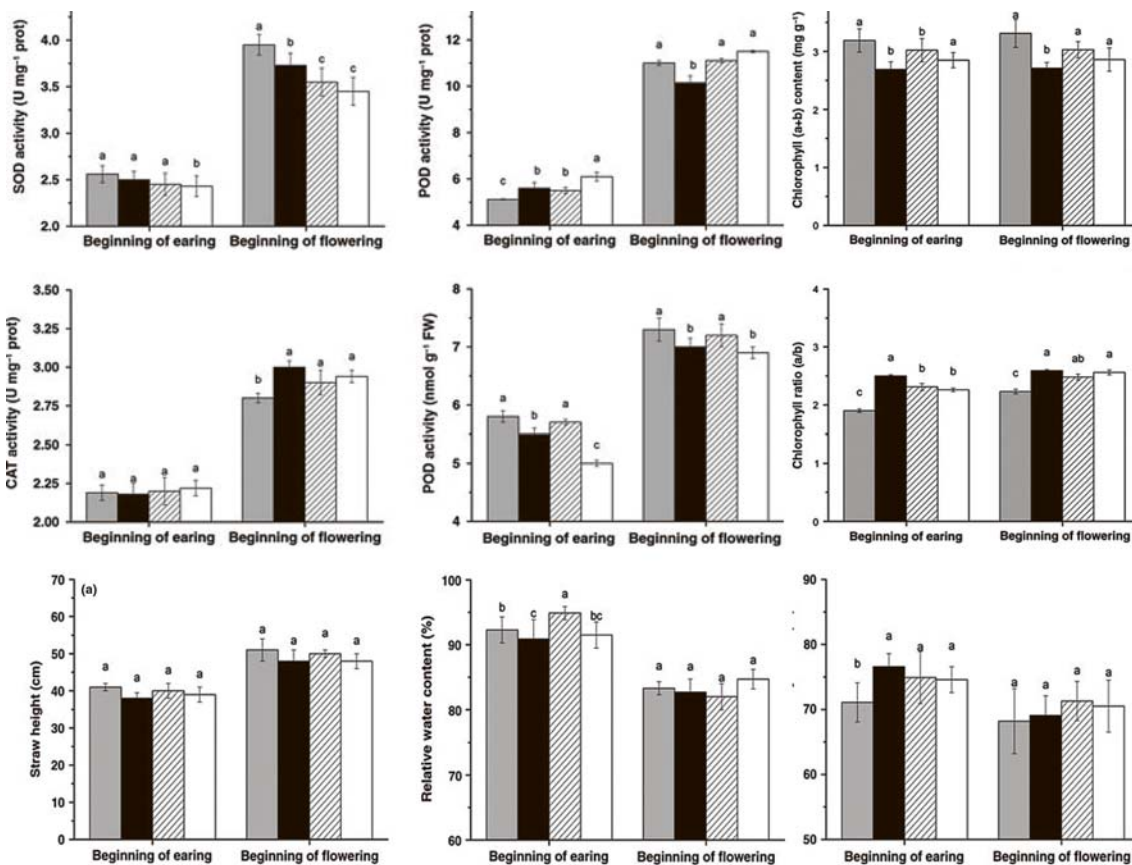


Рис 12. Значения исследуемых факторов в двух фазах роста пшеницы под красными, красно-синими, красно-белыми и белыми светодиодами

Однако основным направлением исследований сегодня является исправление недостатков узкополосного красно-синего освещения добавлением белого света. Например, японские исследователи [5, 6] выявили увеличение массы и питательной ценности салата и томатов при добавлении к красному свету белого. На практике это означает, что, если эстетическая привлекательность растения во время роста неважна, отказываться от уже купленных узкополосных красно-синих светильников необязательно, светильники белого света можно использовать дополнительно.

Влияние качества света на результат

Фундаментальный закон экологии «бочка Либиха» (рис. 13) гласит: развитие ограничивает фактор, сильнее других отклоняющийся от нормы. Например, если в полном объеме

обеспечены вода, минеральные вещества и CO_2 , но интенсивность освещения составляет 30 % от оптимального значения — растение даст не более 30 % максимально возможного урожая.

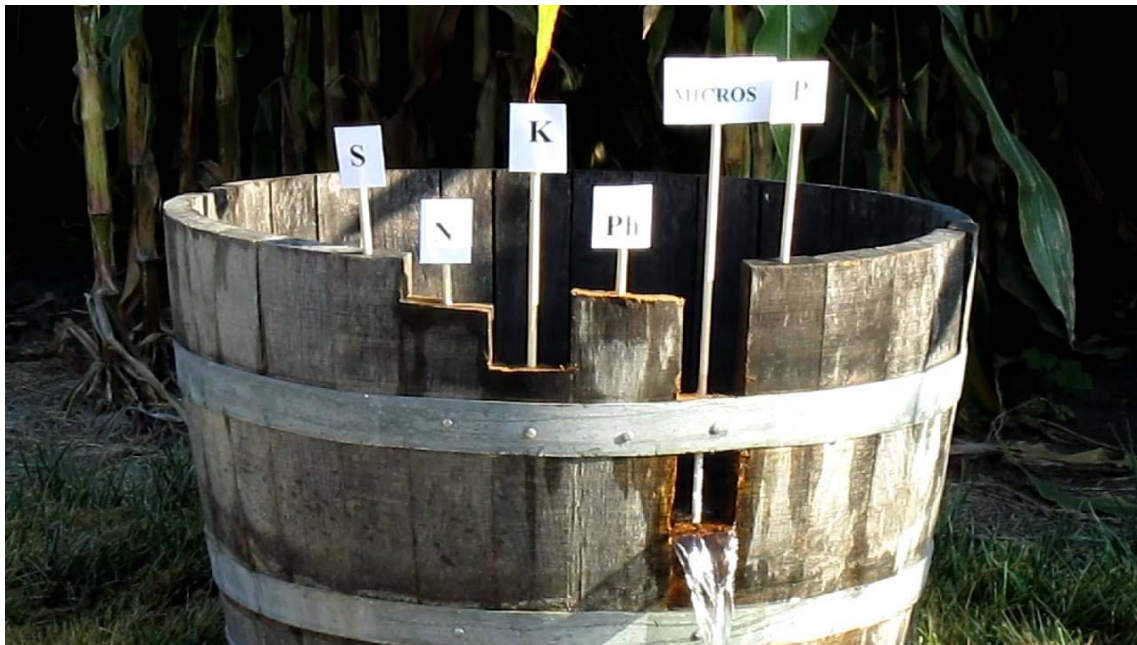


Рис. 13. Иллюстрация принципа ограничивающего фактора из [обучающего ролика на YouTube](#)

Реакция растения на свет: интенсивность газообмена, потребления питательных веществ из раствора и процессов синтеза — определяется лабораторным путем. Отклики характеризуют не только фотосинтез, но и процессы роста, цветения, синтеза необходимых для вкуса и аромата веществ.

На рис. 14 показана реакция растения на изменение длины волны освещения. Измерялась интенсивность потребления натрия и фосфора из питательного раствора мятой, земляникой и салатом. Пики на таких графиках — признаки стимулирования конкретной химической реакции. По графикам видно что исключить из полного спектра ради экономии какие-то диапазоны, — все равно что удалить часть клавиш рояля и играть мелодию на оставшихся.

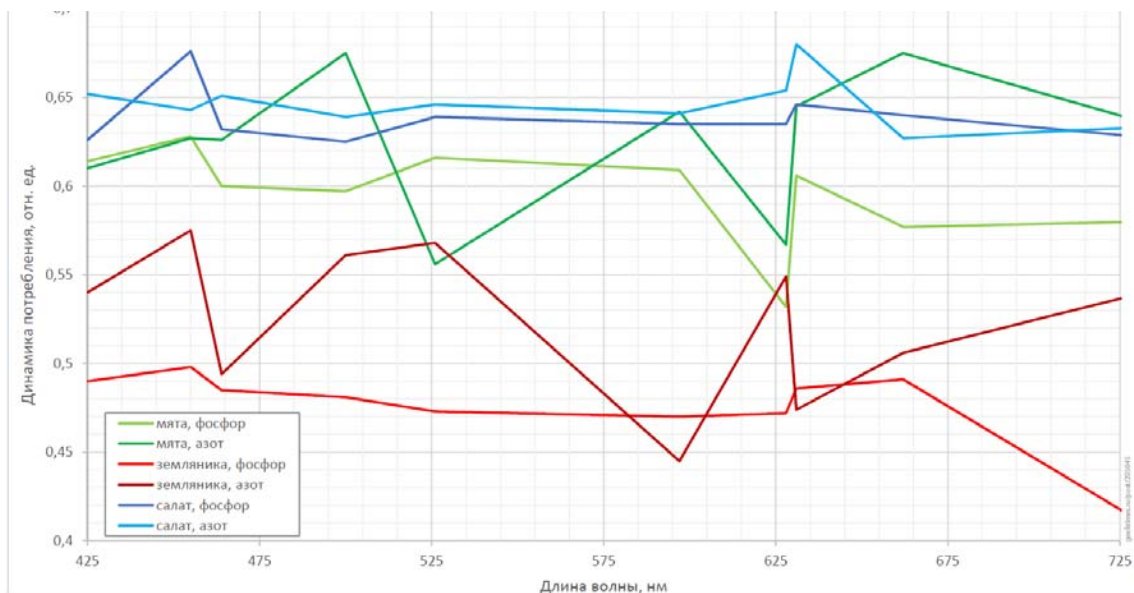


Рис. 14. Стимулирующая роль света для потребления азота и фосфора мятой, земляникой и салатом (данные предоставлены компанией Фитэкс)

Принцип ограничивающего фактора можно распространить на отдельные спектральные составляющие — для полноценного результата в любом случае нужен полный спектр. Изъятие из полного спектра некоторых диапазонов не ведет к значимому росту энергетической эффективности, но может сработать «бочка Либиха» — и результат окажется отрицательным.

Примеры демонстрируют, что обычный белый светодиодный свет и специализированный «красно-синий фитосвет» при освещении растений обладают примерно одинаковой энергетической эффективностью. Но широкополосный белый комплексно удовлетворяет потребности растения, выражающиеся не только в стимуляции фотосинтеза.

Убирать из сплошного спектра зеленый, чтобы свет из белого превратился в фиолетовый, — маркетинговый ход для покупателей, которые хотят «специального решения», но не выступают квалифицированными заказчиками.

Корректировка белого света

Наиболее распространенные белые светодиоды общего назначения имеют невысокую цветопередачу $Ra = 80$, что обусловлено нехваткой в первую очередь красного цвета (рис. 4).

Недостаток красного в спектре можно восполнить, добавив в светильник красные светодиоды. Такое решение продвигает, [например](#), *CREE*. Логика «бочки Либиха» подсказывает, что такая добавка не повредит, если это действительно добавка, а не перераспределение энергии из других диапазонов в пользу красного.

Интересную и важную работу проделал в 2013–2016 годах ИМБП РАН [7, 8, 9]: там исследовали, как влияет на развитие китайской капусты добавление к свету белых светодиодов 4000 K / $Ra = 70$ света узкополосных красных светодиодов 660 нм.

И выяснили следующее:

- Под светодиодным светом капуста растет примерно так же, как под натриевым, но в ней больше хлорофилла (листья зеленее).
- Сухая масса урожая почти пропорциональна общему количеству света в молях, полученному растением. Больше света — больше капусты.
- Концентрация витамина С в капусте незначительно повышается с ростом освещенности, но значимо увеличивается с добавлением к белому свету красного.
- Значимое увеличение доли красной составляющей в спектре существенно повысило концентрацию нитратов в биомассе. Пришлось оптимизировать питательный раствор и вводить часть азота в аммонийной форме, чтобы не выйти

за ПДК по нитратам. А вот на чисто-белом свете можно было работать только с нитратной формой.

- При этом увеличение доли красного в общем световом потоке почти не влияет на массу урожая. То есть восполнение недостающих спектральных компонент влияет не на количество урожая, а на его качество.
- Более высокая эффективность в молях на ватт красного светодиода приводит к тому, что добавление красного к белому эффективно еще и энергетически.

Таким образом, добавление красного к белому целесообразно в частном случае китайской капусты и вполне возможно в общем случае. Конечно, при биохимическом контроле и правильном подборе удобрений для конкретной культуры.

Варианты обогащения спектра красным светом

Растение не знает, откуда к нему прилетел квант из спектра белого света, а откуда — «красный» квант. Нет необходимости делать специальный спектр в одном светодиоде. И нет необходимости светить красным и белым светом из одного какого-то специального фитосветильника. Достаточно использовать белый свет общего назначения и отдельным светильником красного света освещать растение дополнительно. А когда рядом с растением находится человек, красный светильник можно по датчику движения выключать, чтобы растение выглядело зеленым и симпатичным.

Но оправданно и обратное решение — подобрав состав люминофора, расширить спектр свечения белого светодиода в сторону длинных волн, сбалансировав его так, чтобы свет остался белым. И получится белый свет

экстравысокой цветопередачи, пригодный как для растений, так и для человека.

Открытые вопросы

Можно выявлять роль соотношения дальнего и ближнего красного света и целесообразность использования «синдрома избегания тени» для разных культур. Можно спорить, на какие участки при анализе целесообразно разбивать шкалу длин волн.

Можно обсуждать — нужны ли растению для стимуляции или регуляторной функции длины волн короче 400 нм или длиннее 700 нм. Например, есть частное сообщение, что ультрафиолет значимо влияет на потребительские качества растений. В числе прочего краснолистные сорта салата выращивают без ультрафиолета, и они растут зелеными, но перед продажей облучают ультрафиолетом, они краснеют и отправляются на прилавок. И корректно ли новая метрика *PBAR (plant biologically active radiation)*, описанная в стандарте *ANSI/ASABE S640, Quantities and Units of Electromagnetic Radiation for Plants (Photosynthetic Organisms)*, предписывает учитывать диапазон 280–800 нм.

Заключение

Сетевые магазины выбирают более лежкие сорта, а затем покупатель голосует рублем за более яркие плоды. И почти никто не выбирает вкус и аромат. Но как только мы станем богаче и начнем требовать большего, наука мгновенно даст нужные сорта и рецепты питательного раствора.

А чтобы растение синтезировало все, что для вкуса и аромата нужно, потребуется освещение со спектром, содержащим все длины волн, на которые растение прореагирует, т. е. в общем случае сплошной спектр.

Возможно, базовым решением будет белый свет высокой цветопередачи.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность за помощь в подготовке статьи сотруднику ГНЦ РФ-ИМБП РАН к. б. н. Ирине Коноваловой; руководителю проекта «Фитэкс» Татьяне Тришиной; специалисту компании *CREE* Михаилу Червинскому

Литература

Литература

1. Son K-H, Oh M-M. Leaf shape, growth, and antioxidant phenolic compounds of two lettuce cultivars grown under various combinations of blue and red light-emitting diodes // Hortscience. – 2013. – Vol. 48. – P. 988-95.
2. Ptushenko V.V., Avercheva O.V., Bassarskaya E.M., Berkovich Yu A., Erokhin A.N., Smolyanina S.O., Zhigalova T.V., 2015. Possible reasons of a decline in growth of Chinese cabbage under a combined narrowband red and blue light in comparison with illumination by high-pressure sodium lamp. Scientia Horticulturae <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.08.021>
3. Sharakshane A., 2017, Whole high-quality light environment for humans and plants. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2017.07.001>
4. C. Dong, Y. Fu, G. Liu & H. Liu, 2014, Growth, Photosynthetic Characteristics, Antioxidant Capacity and Biomass Yield and Quality of Wheat (*Triticum aestivum* L.) Exposed to LED Light Sources with Different Spectra Combinations
5. Lin K.H., Huang M.Y., Huang W.D. et al. The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. capitata) // Scientia Horticulturae. – 2013.

– V. 150. – P. 86–91.

6. Lu, N., Maruo T., Johkan M., et al. Effects of supplemental lighting with light-emitting diodes (LEDs) on tomato yield and quality of single-truss tomato plants grown at high planting density // Environ. Control. Biol. – 2012. Vol. 50. – P. 63–74.

7. Коновалова И.О., Беркович Ю.А., Ерохин А.Н., Смолянина С.О., О.С. Яковлева, А.И. Знаменский, И.Г. Тараканов, С.Г. Радченко, С.Н. Лапач. Обоснование оптимальных режимов освещения растений для космической оранжереи «Витацикл-Т». Авиакосмическая и экологическая медицина. 2016. Т. 50. № 4.

8. Коновалова И.О., Беркович Ю.А., Ерохин А.Н., Смолянина С.О., Яковлева О.С., Знаменский А.И., Тараканов И.Г., Радченко С.Г., Лапач С.Н., Трофимов Ю.В., Цвирко В.И. Оптимизация светодиодной системы освещения витаминной космической оранжереи. Авиакосмическая и экологическая медицина. 2016. Т. 50. № 3.

9. Коновалова И.О., Беркович Ю.А., Смолянина С.О., Помелова М.А., Ерохин А.Н., Яковлева О.С., Тараканов И.Г. Влияние параметров светового режима на накопление нитратов в надземной биомассе капусты китайской (*Brassica chinensis* L.) при выращивании со светодиодными облучателями. Агрехимия. 2015. № 11.

Примечание1: Этот пост является переводом статьи [White LED Lighting for Plants](#).

Примечание2: Следующая статья цикла: [Оценить PPF при освещении растения белыми светодиодами просто: 1000 лк = 15 мкмоль/с/м2](#)