

Особенности выбора источников света для биолого-технических систем жизнеобеспечения космического назначения

А.А. ТИХОМИРОВ, С.А. УШАКОВА, В.Н. ШИХОВ

Институт биофизики СО РАН, Красноярск

E-mail: alex-tikhomirov@yandex.ru

Аннотация

Рассмотрены исторические аспекты и перспективы использования источников искусственного света в биолого-технических системах жизнеобеспечения космического назначения. Согласно приведённым данным, наиболее перспективны для таких систем – светодиодные источники света. На основании результатов фотобиологических исследований показано, что по продуктивности растений, культивируемых в системе жизнеобеспечения, излучение, воспринимаемое человеком как белое, по своей спектральной эффективности достоверно отличается от излучения, спектрально подобного усреднённой кривой спектра действия фотосинтеза зелёного листа (т.н. «фитоспектра»). В соответствии с этим обосновываются возможности выбора либо фитоспектра, либо спектра, близкого к равноэнергетическому, для культивирования растений в системах жизнеобеспечения.

Ключевые слова: источники света, спектральный состав света, светодиоды, системы жизнеобеспечения.

1. Введение

Активные исследования по созданию биолого-технических систем жизнеобеспечения (БТСЖО) начались в 60-х годах после первого полёта человека в космос и продолжают в настоящее время в России, США, КНР, ЕС, Японии и др. странах. Фактически во всех созданных БТСЖО предусмотрено использование искусственного освещения, большая часть которого в энергетическом отношении используется в качестве светового питания для функционирования фототрофного звена, которое обеспечивает человека растительной пищей, водой, регенерирует атмосферу и участвует в вовлечении в круговоротный процесс органических отходов.

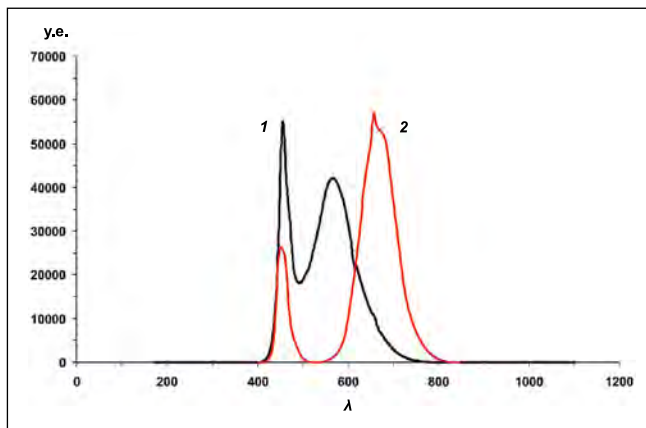
Первые реально действующие БТСЖО с человеком были созданы в Физическом институте АН СССР в середине 60-х годов. В первой такой системе («БИОС-1») в качестве источника воды и регенератора атмосферы для человека использовалась хлорелла [1]. Источником света для таких систем была выбрана ксеноновая лампа с водяным охлаждением ДКсТВ-6000 [2]. Причиной выбора этого источника в основном являлись его: 1) большой поток излучения в области фотосинтетически активной радиации (ФАР), обуславливающий высокую фотосинтетическую активность (в данном случае хлореллы) в продуцировании кислорода для человека и утилизации углекислого газа, выделяющегося при его дыхании; 2) спектральный состав ФАР, подобный солнечному, благоприятствующий фотосинтезу хлореллы; 3) высокая экологичность конструкции (разрушение лампы никаких токсичных веществ в БТСЖО не добавляет); 4) удобство эксплуатации (при большом потоке излучения в области ФАР лампа достаточно компактна, и потому несколько ламп этого типа легко вписываются во внутреннее пространство культиваторов для растений (в данном случае хлореллы)). Практика использования ламп ДКсТВ-6000 в «БИОС-1» оказалась настолько успешной, что в следующей, более совершенной системе «БИОС-2», содержащей и хлореллу, и высшие растения (пшеницу и ряд овощных культур), также использовали лампы этого типа. При этом эти растения, культивируемые под светом данных ламп, давали хорошие показатели роста, развития и продуктивности. На основании этих результатов лампы ДКсТВ-6000 в дальнейшем использовались при создании полномасштабной замкнутой экосистемы «БИОС-3» (для культивирования как хлореллы, так и целого набора зерновых, масличных и овощных культур, обеспечивающих пол-

ноценную растительную диету человека). Излучение ламп ДКсТВ-6000, близкое по относительному спектру в видимой области к солнечному, обеспечивало высокий уровень продуктивности широкого набора культурных растений [3]. Примерно тогда же предпринимались попытки создания БТСЖО с человеком в ИМБП МЗ СССР (ныне ГНЦ РФ – ИМБП РАН). В качестве источников света в таких системах вначале использовали ЛН с водяным охлаждением, а позднее ксеноновые лампы [4]. Эти исследования не получили дальнейшего развития, так как Институт сосредоточился, в основном, на исследовании медико-биологических проблем по обеспечению полётов человека в условиях микрогравитации. В 90-х годах системы жизнеобеспечения с человеком были созданы и протестированы в США. Так, в Космическом центре им. Кеннеди [5] в 1988–2000 годах, в рамках программы NASA, функционировала специальная камера («NASA's Biomass Production Chamber»), в которой культивировали различные виды высших растений, как основы фотосинтезирующего звена замкнутой экосистемы [6, 7]. В этих исследованиях для культивирования растений использовали МГЛ с излучением белого цвета и НЛВД. В дальнейшем в этой организации велись также исследования по обоснованию возможности использования синее-красного излучения в системах жизнеобеспечения [8]. Фактически тогда же в Хьюстонском космическом центре им. Л. Джонсона [9] проводились исследования по созданию БТСЖО с человеком при использовании высших растений. Для выращивания растений пшеницы использовали МГЛ с излучением, воспринимаемым глазом как белое, а для выращивания салата – светодиоды, дающие комбинированное излучение в синей и красной областях спектра [10].

В то же самое время в Японии была создана БТСЖО, в которой для культивирования растений использовали или искусственное, или естественное, или смешанное освещение. В ряде «компартов» этой системы использовали только искусственный свет, создаваемый НЛВД [11].

За последние несколько лет созданы новые современные БТСЖО в Пекине и Шеньджене (КНР). Обе эти системы оснащены облучателями со светоди-

Рис. 1. Относительные спектры излучения облучателей, дающих белое (1) и сине-красное /фитоспектр/ (2) излучение



одами, дающими комбинацию сине-красного и белого излучения, для культивирования растений [12, 13].

Несмотря на то, что перспективы использования светодиодных ламп в будущих БТСЖО не вызывают возражений, тем не менее до сих пор нет чёткого представления о том, каким должен быть спектр излучения таких ламп в условиях БТСЖО. Первые попытки использования светодиодных ламп применительно к БТСЖО были предприняты на рубеже 80–90-х годов, когда первые образцы облучателей с красными светодиодами были протестированы на растениях на предмет использования в БТСЖО [14, 15]. Однако эти попытки не получили распространения, поскольку первые образцы светодиодов давали слишком слабое, и фактически только красное, излучение, не обеспечивавшее полноценное протекание продукционного процесса у различных видов растений. Дальнейший прогресс в совершенствовании облучательной техники со светодиодами, в первую очередь связанный с созданием синих светодиодов, позволил создавать облучатели со светодиодами с практически неограниченными возможностями варьирования спектра видимого излучения. Распространённая среди ряда светотехников и растениеводов точка зрения о высокой спектральной эффективности излучения, по структуре спектра подобного спектра действия фотосинтеза зелёного листа [16, 17], привела к тому, что светотехническая промышленность стала серийно выпускать облучатели, дающие сине-красное излучение (так называемый «фитоспектр»). Опыт использования таких облучателей для культивирования растений показал, что не всегда светодиоды с фитоспектром обеспечивают более высокую

продуктивность растений, чем светодиоды белого света — нередко получаются сопоставимые по продуктивности результаты. В частности, такие результаты получены на салате [18].

Чтобы выяснить, насколько такой вывод может касаться других культур, входящих в основной ассортимент фототрофного звена БТСЖО, нами были выполнены эксперименты по культивированию пшеницы линии 232, чуфы и редиса в терморегулируемых герметичных вегетационных камерах с облучателями со светодиодами, дающими белый и сине-красный спектры излучения.

2. Методика эксперимента

Растения выращивали методом гидропонии с использованием стандартных питательных растворов (среда Кнопа с добавками цитрата железа и микроэлементов). Температура воздуха в камерах поддерживалась в пределах $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$. Выбранные виды растений ранее долго и успешно культивировали в замкнутой экосистеме «БИОС-3» [3]. Для проведения экспериментов использовали светильники компании ООО «Лед-Энергосервис» (торговый знак «Оптоган»), дающие излучение, воспринимаемое глазом как белое, и светильники, дающие преимущественно сине-красное излучение (рис. 1). Плотность фотосинтетического фотонного потока для редиса равнялась $750 \text{ мкмоль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, а для более светолюбивых культур (пшеница, чуфа) — $1000 \text{ мкмоль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. В радиометрических измерениях использовался квантометр «LI-250A» (LiCOR, США). Спектры излучения используемых облучателей (рис. 1) измерялись посредством спектрометра «AvaSpec-ULS2048-USB2» (Avantes, Нидерланды). Более детально методика и спо-

соб культивирования растений изложены в статьях [19, 20].

3. Результаты эксперимента и их обсуждение

Полученные результаты (рис. 2) показывают, что различия в продукционных характеристиках исследованных видов растений лежат в пределах ошибки измерений. Подобный же вывод получен для салата в работе [18].

Многолетние исследования по оценке спектральной эффективности излучения в продукционном процессе, выполненные в Институте биофизики СО РАН [21], показали, что правильный подбор уровней облучения при спектре излучения в области ФАР, близком к равноэнергетическому, позволяет стабильно иметь высокую продуктивность фактически всех видов культурных растений, используемых в БТСЖО [3]. Что касается достижения потенциально возможных продуктивностей растений, то оно возможно при определённых отклонениях от равноэнергетичности спектра излучения. Кроме того, надо учитывать, что при культивировании ключевых для формирования растительной диеты человека видов растений для достижения высоких продуктивностей необходимы весьма высокие облучённости в области ФАР. При этом фитоценозы должны обладать высокой оптической плотностью (большим листовым индексом) [22]. Эти обстоятельства могут существенно влиять на сдвиг спектральной эффективности излучения из красной области спектра в более коротковолновую часть области ФАР [23, 24]. При этом возникает определённая зависимость между спектром излучения и видом растений [21, 22].

Важно также отметить, что при работе в световой среде, создаваемой светодиодами с сильным отличием излучения от белого, у обслуживающего персонала может быстро утомляться зрение, искажаться цветовосприятие и возникать ощущение дискомфорта. Это подтверждается данными о том, что источники света с достаточно большой синей составляющей спектра ФАР могут оказывать весьма вредное воздействие на структуру глаза человека и его физиологическое состояние в целом. В частности, этому вопросу посвящена статья [25], в которой подчёркивается, что этот недостаток характерен для светодиодов с до-

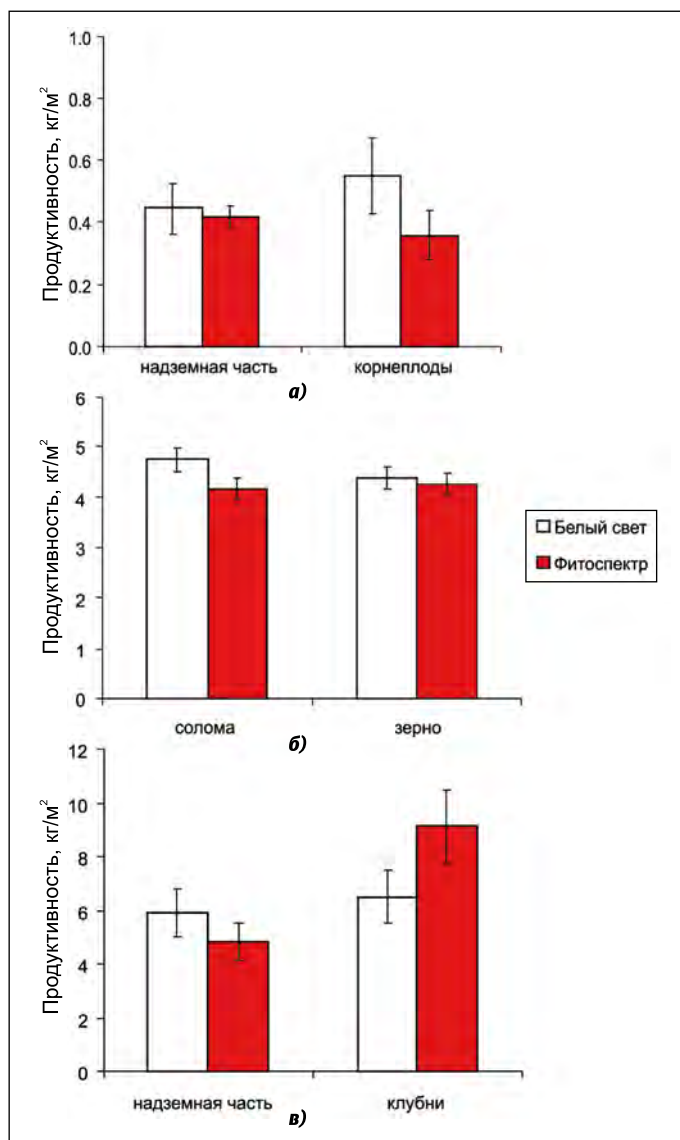


Рис. 2. Продуктивность растений при использовании облучателей со светодиодами разного спектра излучения: а – редис; б – пшеница; в – чуфа

лей синего излучения порядка 30 % и более. К сожалению, многие современные облучатели со светодиодами, относящиеся к так называемым «фитолампам», имеют в видимой области спектра синюю долю как раз около 30 % и более, что, вероятно, позволяет отнести их к роду изделий с повышенным риском негативного воздействия на глаз человека.

И хотя для получения детальных представлений о механизмах, лежащих в основе данного «негатива», требуются специальные дополнительные исследования, для нас пока очевидно, что для человека он весьма нежелателен, а для обитателей БТСЖО, которые могут находиться в изоляции вне земных условий, и вовсе недопустим. Поэтому при использовании облучателей со светодиодами в БТСЖО целесообразно ориентироваться на близкий к равноэнергетическому спектр их излучения. В этом случае решаются

две важные задачи по созданию световой среды для растений и человека: обеспечивается высокая продуктивность растений и устраняется отрицательное воздействие видимого излучения на глаз человека. Вероятно, поэтому сейчас заметна тенденция «ухода» от световой среды, создаваемой в БТСЖО облучателями со светодиодами сине-красного излучения. В частности, сине-красное излучение в этом случае «разбавляют» путём смешивания его с белым [12, 13, 26].

4. Заключение

На сегодня несомненным приоритетом в использовании в БТСЖО обладают облучатели со светодиодами. Подбор спектра излучения таких облучателей должен представлять собой компромисс между требованиями к спектральной эффективности излучения для культивируемых в БТСЖО

ценозов разных видов растений и к созданию комфортной световой среды для глаза человека. Соответственно, предпочтение следует отдавать облучателям со светодиодами, дающим излучение, близкое к белому.

Исследование по эффективности облучателей со светодиодами для культивирования пшеницы, редиса и чуфы выполнено в Институте биофизики СО РАН при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-14-00599П), а остальные результаты соответствуют теме госзадания VI.56.1.4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gitelson J.I., Lisovsky G.M., McElroy R.D., Manmade Closed Ecological Systems. – New York: Taylor and Francis, 2003.
2. Маршак И.С., Васильев В.И., Тохадзе И.А. Малогабаритная безбалластная трубчатая ксеноновая лампа с водяным охлаждением // Светотехника. – 1963. – № 11. – С. 13–17.
3. Замкнутая система: человек – высшие растения / Под ред. Г.М. Лисовского. – Новосибирск: Наука, 1979. – 160 с.
4. Божко А.Н., Вильямс М.В., Алёхина Т.Г., Машинский А.Л. Особенности химического состава зеленных растений при длительном культивировании на ионитном субстрате в обитаемой гермокабине / Космическая биология и авиакосмическая медицина. – М.: Наука, 1972. – С. 168–173.
5. URL: <https://www.kennedyspacecenter.com> (дата обращения: 11.04.2018).
6. Wheeler R.M., Mackowiak C.L., Stutte G.W., Yorio N.C., Ruffe L.M., Sager J.C., Prince R.P., Knott W.M. Crop productivities and radiation use efficiencies for bioregenerative life support // Advances in Space Research. – 2008. – Vol. 41, No. 5. – P. 706–713.
7. Raymond M. Wheeler. Agriculture for Space: People and Places Paving the Way // Open Agriculture. – 2017. – No.2. – P. 14–32.
8. Schuerger A.C., Copenhaver K.L., Lewis D., Kincaid R., May G. Canopy structure and imaging geometry may create unique problems during spectral reflectance measurements of crop canopies in bioregenerative advanced life support systems // International Journal of Astrobiology. – 2007. – Vol. 6, No. 2. – P. 109–121.
9. URL: <http://www.nasa.gov/centers/johnson/home/> (дата обращения: 16.04.2018).
10. URL: <http://www.agrospaceconference.com/wp-content/uploads/2016/06/Barta-The-Lunar-Mars-Life-Support-Test-Project.pdf> (дата обращения: 14.06.2018).
11. Tako Y., Arai R., Tsuga S., Komatsubara O., Masuda T., Nozoe S., Nitta K.. CEEF: Closed Ecology Experiment Facilities. Gravitation and Space Biol. – 2010. – Vol. 23, No. 2. – P. 13–24.

12. Dong C., Fu Y., Liu G., Liu H. Growth photosynthetic characteristics, antioxidant capacity and biomass yield and quality of wheat (*Triticum aestivum* L.) exposed to LED light sources with different spectra combinations // J. Agronomy and Crop Sci.– 2014. – Vol. 200. – P. 219–230.

13. URL: <http://english.cctv.com/2016/12/14/VIDEvMLAnbgqUGqAdZnis9IU161214.shtml> (дата обращения: 11.04.2018).

14. Bula R.J., Morrow R.C., Tibbitts T.W., Barta D.J., Ignatius R.W., Martin T.S. Light-emitting diodes as a radiation source for plants // HortScience.– 1991. – Vol. 26. – P. 203–205.

15. Barta D.J., Tibbitts T.W., Bula R.J., Morrow R.C. Evaluation of light emitting diodes characteristics for a space-based plant irradiation source // Advances in Space Research.– 1992. – Vol. 12, No.5. – P. 141–149.

16. Brown C.S., Schuenger, A.C., Sager, J.C. Growth and photomorphogenesis of pepper plants under red light-emitting diodes with supplemental blue or far-red lighting // J. Am. Soc. Hortic. Sci.– 1995. – Vol. 120. – P. 808–813.

17. ОСТ 46.140–83 Минсельхоза СССР. «Излучение оптическое. Оценка фотосинтезной эффективности. Термины и определения». – М.: МСХ СССР, 1983.

18. Lina Kuan-Hung, Huang Meng-Yuan, Huang Wen-Dar, Hsueh Ming-Huang, Yang Zhi-Wei, Yang Chi-Ming 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. – Vol. 150. – P. 86–91.

19. Shklyavtsova E.S., Ushakova S.A., Shikhov V.N., Anishchenko O.V. Effects of mineral nutrition conditions on heat tolerance of chufa (*Cyperus esculentus* L.) plant communities to super optimal air temperatures in the BTLSS // Advances in Space Research.– 2014. – Vol. 54. – P. 1135–1145.

20. Карначук Р.А., Вайшла О.Б., Дорофеев В.Ю., Ушакова С.А., Тихомиров А.А., Лассер Х., Гро Ж.-Б. Влияние условий выращивания на гормональный статус и урожайность высокорослой и карликовой линий пшеницы // Физиология растений.– 2003. – Т. 50, № 2. – С. 265–270

21. Тихомиров А.А., Лисовский Г.М., Сидько Ф.Я. Спектральный состав света и продуктивность растений. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1991.– 168 с.

22. Тихомиров А.А. Фитоценоз как биологический приёмник оптического излучения // Светотехника.– 1998.– № 4. – С. 22–24.

23. Тихомиров А.А., Золотухин И.Г., Лисовский Г.М., Сидько Ф.Я., Лисовский Г.М., Прикупец Л.Б. Способ выращивания огурца / Авт. свид. № 1620062 СССР. 1991. Бюл. № 2.

24. Тихомиров А.А., Золотухин И.Г., Прикупец Л.Б., Лисовский Г.М., Сидько Ф.Я., Сарычев Г.С. Способ выращивания тома-

тов / Авт. свид. № 1754021 СССР. 1992. Бюл. № 30.

25. Дейнего В.Н., Капцов В.А., Балашевич Л.И., Светлова О.В., Макаров Ф.Н., Гусева М.Г., Кошиц И.Н. Профилактика глазных заболеваний: Светобиологическая безопасность и гигиена энергосберегающих источников света. Аналитический обзор // Глаз.– 2016. – Т. 107, № 1. – С. 18–33.

26. Fu Y., Li L., Xie B., Dong C., Wang M., Jia B., Sho L., Dong Y., Deng S., Liu H., Liu G., Liu B., Hu D., and Liu H. How to establish a bioregenerative life support system for long-term crewed missions to the Moon and Mars // Astrobiology.– 2016. – DOI: 10.1089/ast.2016.1477.



Тихомиров Александр Аполлинарьевич, доктор биол. наук, профессор. Окончил в 1970 г. Красноярский государственный университет по специальности «Физика», физик-биофизик. Зав. лабора-

торией управления биосинтезом фототрофов Института биофизики СО РАН и зав. кафедрой «Замкнутые экосистемы» Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева. Область научных интересов: фитоактинометрия, светофизиология растений, замкнутые экосистемы



Ушакова Софья Аврумовна, кандидат биол. наук. Окончила в 1968 г. Новосибирский государственный университет по специальности «Физика», физик-биофизик. Ведущий научный сотрудник

лаборатории управления биосинтезом фототрофов Института биофизики СО РАН. Область научных интересов: фотосинтез и продуктивность высших растений как компонента искусственных экосистем, устойчивость растений к неблагоприятным условиям внешней среды



Шихов Валентин Николаевич, кандидат биол. наук. Окончил в 1997 г. Красноярский государственный университет по специальности «Физика», биофизик. Научный сотрудник лаборатории

управления биосинтезом фототрофов Института биофизики СО РАН. Область научных интересов: биофизика фотосинтеза, флуоресценция хлорофилла, возрастная физиология растений, стрессовые реакции у высших растений

Новая групповая система аварийного освещения «DIALOG 24»

Сегодня рынок аварийного освещения всё больше сдвигается в сторону проектных решений. В крупных проектах применение систем централизованного питания экономически более оправдано по сравнению с автономными аварийными светильниками. Растущий спрос на централизованные системы «DIALOG» и уже реализованные компанией «Световые Технологии» проекты показывают, что такие системы перестали быть экзотикой для российского рынка.

Следуя спросу, компания в июле 2018 г. выводит на рынок новую систему центра-



лизованного питания, рассчитанную на светильники с низким напряжением питания (24 В) и общую нагрузку до 400 Вт. Такие решения оправданы для небольших объектов, таких как магазины, парковки, детские сады. За счёт того, что в такой системе аккумуляторная установка содержит всего два аккумулятора, её стоимость ниже, чем систем, рассчитанных на напряжение питания 230 В. Данная система имеет преимущества и с точки зрения электробезопасности, т.к. подаёт низкое напряжение, что востребовано, например, в детских дошкольных учреждениях.

Система «DIALOG 24», рассчитанная на 400 Вт подключаемой нагрузки, состоит из компактного шкафа, в котором установлены аккумуляторы, управляющий контроллер, зарядное устройство, аппараты защиты. Шкаф рассчитан на управление тремя группами светильников, в каждой из которых может быть до 20 аварийных светильников.

Для подключения к данной системе компания «Световые Технологии» предлагает и сами аварийные светильники, рассчитанные на работу от постоянного напряжения 24 В.

ltcompany.com
16.07.2018