

Инна Валерьевна Князева

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, старший научный сотрудник лаборатории исследований технологических свойств сельскохозяйственных материалов, кандидат биологических наук, Россия, Москва

E-mail: knyazewa.inna@yandex.ru

ИСКУССТВЕННОЕ ОСВЕЩЕНИЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ

Существуют возможности для повышения урожайности и качества сельскохозяйственных растений путем сочетания достижений в области контроля окружающей среды, физиологии и автоматизированных систем, позволяющих выращивать более разнообразный сортимент культур с оптимальным размером, поддерживая акцент на потребительских свойствах, таких как вкус или накопление полезных соединений для здоровья. Цель – установить влияние искусственного освещения в закрытых агроэкосистемах на изменение морфофизиологических признаков, накопление биологически активных веществ в растениях и определить их роль в получении функциональных продуктов питания. Биологически активные соединения в растениях известны как первичные или вторичные метаболиты, которые придают растениям аромат, цвет и вкус. В результате исследований было установлено, что качество и интенсивность света влияют как на биомассу растений, так и на концентрацию полезных соединений (аскорбиновой кислоты, антоцианов, эфирных масел, растворимых сахаров и белков, крахмала, полифенола), синтез β -каротина, лютеина, α -токоферола, макро- и микроэлементов; во время созревания культур могут оказывать различное влияние на метаболомный состав и способствовать накоплению биологически активных соединений, влияющих на качество плодов. Управление гидропонным питательным раствором способствует получению низкокалорийных овощей, а также овощей с низким содержанием нитратов. Высокий уровень экологического контроля в закрытых агроэкосистемах при искусственном освещении позволяет управлять циркадными ритмами растений. Манипулирование спектром, интенсивностью и временем света дает новые возможности для практической селекции в контролируемой среде.

Ключевые слова: искусственное освещение, функциональное питание, биологически активные соединения, закрытая агроэкосистема.

Inna V. Knyazeva

Federal scientific agroengineering center VIM, senior staff scientist of the laboratory of researches of technological properties of agricultural materials, candidate of biological sciences, Russia, Moscow

E-mail: knyazewa.inna@yandex.ru

ARTIFICIAL LIGHTING FOR RECEIVING FUNCTIONAL FOOD

There are opportunities to improve the yield and quality of agricultural plants by combining advances in environmental control, physiology and automated systems that allow you to grow more diverse range of crops with optimal size, supporting the emphasis on consumer properties such as taste or the accumulation of the substances beneficial to health. The objective of this review study is to determine the effect of artificial lighting in closed agro-ecosystems on changing morphophysiological traits, accumulation of biologically active substances in plants, and their role in producing functional food. Biologically active compounds in plants are known as primary or secondary metabolites giving plants flavor, color and taste. The

studies have shown that the quality and intensity of light affect both the biomass of plants and the concentration of beneficial compounds (ascorbic acid, anthocyanins, essential oils, soluble sugars and proteins, starch, polyphenol, the synthesis of β -carotene, lutein, α -tocopherol, macro- and microelements); during the maturation of cultures may have different effects on metabolic composition and promote the accumulation of biologically active compounds affecting the quality of fruits. Management of hydroponic nutrient solution promotes the production of low-calorie vegetables as well as vegetables with low nitrate content. High level of ecological control in closed agroecosystems with artificial lighting, allows controlling circadian rhythms of plants. The manipulation of spectrum, intensity and time of light gives new possibilities for practical selection in controlled environment.

Keywords: *artificial lighting, functional nutrition, biologically active compounds, closed agroecosystem.*

Введение. Растущий спрос мировых рынков на высококачественную продукцию приводит все большее число сельскохозяйственных структур растениеводства к созданию защищенной среды обитания. Искусственные агроэкосистемы позволяют регулировать макро- и микроокружение, что способствует оптимальному росту растений, увеличению продолжительности выращивания, скороспелости, получению более высоких урожаев и качественных продуктов питания [1]. По данным Продовольственной и сельскохозяйственной Организации Объединенных Наций (ФАО), в 2050 году мировое население достигнет 9,7 миллиарда человек, причем 75 % из них будут проживать в городских центрах [2]. В связи с этим продовольственное снабжение и продовольственная безопасность находятся под угрозой, и городское сельское хозяйство могло бы помочь решить эту проблему.

Цель работы. Анализ влияния искусственного освещения на накопление биологически активных веществ в растениях для получения функциональных продуктов питания.

Научные разработки в области здорового питания приобретают все большую популярность во всем мире [3–5]. В России появилось понятие «функциональные продукты питания». В Америке понятие – «Funcional Food» [6]. На первый план выходит производство «продуктов нового поколения», к основным принципам разработки которых относятся: натуральность состава; экологически безопасное сырье; сбалансированность по составу в соответствии с потребностями человеческого организма; продукты не должны содержать консервантов, красителей, лекарственных и витаминных препаратов, ароматизаторов, стабилизаторов химического происхождения; продукты должны защищать организм от неблагоприятных воздействий окру-

жающей среды, очищать организм от загрязнителей с помощью натуральных сорбентов, иметь лечебно-профилактические свойства [7, 8]. Согласно официальному определению Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии, функциональные пищевые продукты – это пищевые продукты, предназначенные для систематического употребления в составе пищевых рационов всеми возрастными группами здорового населения, снижающие риск развития заболеваний, связанных с питанием, сохраняющие и улучшающие здоровье за счет наличия в его составе функциональных пищевых ингредиентов [9]. Согласно определению американских ученых из Института функционального питания, под функциональными продуктами понимаются натуральные или обработанные растительные продукты, содержащие известные или неизвестные биологически активные компоненты (фитохимические вещества), которые в определенных эффективных нетоксичных количествах обеспечивают клинически доказанную и документированную пользу для здоровья, профилактики или лечения хронических заболеваний [10].

Высококачественные (функциональные) продукты питания с оптимизированными питательными веществами можно получить, контролируя их окружающую среду. Управление гидронным питательным раствором способствует получению низкокалорийных овощей, а также овощей с низким содержанием нитратов. Спектр излучения влияет как на биомассу растений, так и на концентрацию полезных соединений (аскорбиновой кислоты, антоцианов, эфирных масел, макро- и микроэлементов) для ряда овощей и других культур [11]. Некоторые стресс-факторы, такие как недостаток воды, более высокая или низкая температура, высокая интен-

сивность света, УФ-облучение, низкая температура корневой зоны и т.д., эффективны для увеличения функциональных компонентов в растениях [12].

В исследовательской лаборатории Philips Research Laboratories и новом Grow Wise центре (Нидерланды) используют светодиодное освещение с большим разнообразием спектрального состава (от ультрафиолетового до дальнего красного) и динамическое управление с общим уровнем излучения, регулируемой яркостью до $600 \text{ мкмоль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Стратегии роста, сочетающие в себе признаки качества урожая (цвет, питательные вещества, высокий индекс антоцианов или хлорофилла, флавоноидов, контролируемое содержание нитратов, срок годности) и эффективный рост (г моль^{-1}), являются ключевыми для экономического развития искусственных агроэкосистем [13, 14].

В коммерческих голландских вертикальных фермах используют несколько стандартных комбинаций светодиодного излучения (красный/синий или красный/белый с красным или без него) для получения функциональных продуктов питания. В качестве контроля использовали стандартное сочетание красно-белого светодиодного излучения, в эксперименте изменили спектр на более интенсивный синий и дальний красный, а также применили в течение нескольких дней непрерывную световую стимуляцию непосредственно перед сбором урожая. Исследования показали, что при разных комбинациях спектрального излучения изменялось содержание витаминов С, К, хлорофилла и флавоноидов в овощных культурах (салате, шпинате, рукколе и базилике), а также и вкусовые качества, но величина данного признака сильно зависела от сорта. Кроме того, интенсивность излучения влияла на срок годности шпината и рукколы с увеличением на несколько суток. Наиболее эффективным при сохранении овощной продукции было излучение с содержанием синего спектра (35 %), менее – вариант с дальним красным спектром (25 %). [15]. Процессы созревания и лежащие в их основе молекулярные механизмы различны между климактерическими и неклимактерическими плодами. Метаболические профили томатов изменяются во время созревания, и освещение может модулировать активность соответствующих биохимических веществ.

Полезные для здоровья соединения (каротиноиды, флавоноиды, токоферолы и фенольные кислоты) накапливались быстрее при белом спектре излучения по сравнению с темнотой, в то время как алкалоиды и хлорофиллы уменьшались быстрее. Искусственное освещение также способствовало изменению уровней вкусовых метаболитов, включая глутамат и малат. Воздействие светового спектра показало, что добавление синего спектра излучения было наиболее эффективным методом воздействия на метаболитом плодов [16].

В Национальном инженерно-исследовательском центре информационных технологий в сельском хозяйстве г. Пекина проводили исследования по влиянию зеленого светодиодного спектра излучения на рост и качество салата-латука (*Lactuca sativa* L.). В качестве единственного источника излучения для выращивания салата в камере роста использовались регулируемые белые и зеленые светодиодные панели. Белый спектр излучения в интервале 8:00–20:00 ($160 \text{ мкмоль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$) рассматривали как основной для нормального роста салата, а зеленый спектр – в качестве дополнительного источника излучения с различной интенсивностью (30, 60 и $90 \text{ мкмоль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$). Дополнительный зеленый спектр способствовал накоплению растворимого сахара, сырого белка и витамина С на разных стадиях развития салата, а также уменьшению содержания нитратов [17]. Аналогичные исследования по использованию зеленого светодиодного излучения в сочетании с синим и красным для повышения эффективности роста салата-латука проведены учеными из Сингапура. Растения выращивали в течение 50 дней в камере роста на гидропонике при $18 \text{ }^\circ\text{C}$ в двух вариантах излучения (красный/синий/зеленый и красный/синий) с фотосинтетически активной радиацией (ФАР) в диапазоне $85\text{--}87 \text{ мкмоль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Зеленые и синие спектры влияли на фотоморфогенную реакцию с локальным развитием (стебель и лист) растений салата [18].

Искусственное освещение влияет на фотоокислительные свойства растений, модулируя систему антиоксидантной защиты, что приводит к повышению активности антиоксидантных ферментов [19]. Повышенное накопление растительных метаболитов, как первичных, так и вторичных (растворимых сахаров, крахмала, белка), наблюдалось в присутствии односпек-

тральных красных (625–630 нм) или синих (465–470 нм) светодиодов по сравнению с белым спектром излучения (табл.). Односпектральный красный в сочетании с синими и красными светодиодами также увеличивает накопление пер-

вичных метаболитов и антоцианов, общих полифенолов, флавоноидов, синтез β -каротина, лютеина, α -токоферола. Красный спектр излучения оказывает более выраженное влияние на накопление антоциана, чем синий [20, 21].

Влияние искусственного освещения на синтез биологически активных соединений в растениях [22]

Свет LED	Интенсивность света	Культура	Синтез биологически активных соединений
Красный	80 мкмоль м ⁻² с ⁻¹	<i>Brassica campestris</i> L.	Крахмал
	128 мкмоль м ⁻² с ⁻¹	<i>Pisum sativum</i> L.	β -каротин
	500 мкмоль м ⁻² с ⁻¹	<i>Triticum aestivum</i> L.	Лигнин
	50 мкмоль м ⁻² с ⁻¹	<i>B. oleracea var. italic</i>	Замедленное старение
Синий	100–200 мкмоль м ⁻² с ⁻¹	<i>Lactuca sativa</i> L.	Фенольные соединения, витамин С, токоферол, каротиноиды
	80 мкмоль м ⁻² с ⁻¹	<i>Brassica campestris</i> L.	Витамин С
	>20–40 мкмоль м ⁻² с ⁻¹	<i>Fragaria</i> × <i>ananassa</i> Duch.	Органические кислоты, антоциан
	50–80 мкмоль м ⁻² с ⁻¹	<i>B. rapa</i> , <i>B. oleracea var. capitata</i>	Витамин С, содержание полифенолов
	85–150 мкмоль м ⁻² с ⁻¹	<i>Solanum lycopersicum</i> L.	Пролин, активные формы кислорода, полифенольные соединения, γ -аминомасляная кислота
Зеленый	~200 мкмоль м ⁻² с ⁻¹	<i>Lactuca sativa</i> , <i>Triticum aestivum</i> , <i>B. oleracea var. capitata</i> , <i>Fragaria</i> × <i>ananassa</i>	Фенольные соединения, витамин С, α -токоферол, антоциан
Желтый	~100 мкмоль м ⁻² с ⁻¹	<i>Raphanus sativus</i> , <i>S. lycopersicum</i> , <i>Capsicum annuum</i> L.	Витамин С, α -токоферол, γ -токоферол, лютеин
Красный+синий	>20 мкмоль м ⁻² с ⁻¹	<i>Fragaria</i> × <i>ananassa</i>	Органическая кислота
	90 мкмоль м ⁻² с ⁻¹	<i>Lactuca sativa</i>	Антоциан
	–	<i>B. rapa</i> , <i>B. alboglabra</i>	Полифенолы, флавоноиды, глюкозинолаты
Красный + синий + белый	210 мкмоль м ⁻² с ⁻¹	<i>Lactuca sativa</i>	Растворимый сахар, содержание нитратов
Красный + дальний красный	50-200 мкмоль м ⁻² с ⁻¹	<i>Lactuca sativa</i>	Содержание фенолов, летучих соединений

Заключение. Искусственное освещение позволяет управлять физиологическими процессами путем регулирования основных факторов роста растений, таких как свет, температура, влажность, концентрация двуокиси углерода (CO₂), воды и питательных веществ. Освещение имеет решающее значение для фотосинтеза и роста растений. Помимо фотосинтеза, динамическое освещение контролирует урожайность и качество за счет использования циркадианных часов, главного регулятора физиологии. Сочетание различных длин волн спектра излучения в различных пропорциях позволяет улучшить питательные свойства сельскохозяйственных культур с целью получения «продуктов нового поколения». Одновременно с этим развитие закрытого земледелия в качестве новой системы растениеводства будет способствовать развитию фундаментальной науки о растениях и даст новые возможности для практической селекции в контролируемой среде.

Литература

1. Gruda N., Tanny J. Protected Crops. // Horticulture: Plants for People and Places. 2014. № 1. P. 327–405.
2. United Nations Food and Agriculture Organization (FAO). OECD-FAO Agricultural Outlook 2018–2027. 2018. DOI: 10.1787/agr_outlook-2018-en.
3. Roberfroid M.B. Global view on functional foods: European perspectives // British Journal of Nutrition. 2002. 88(2). Pp.133–138. DOI: 10.1079/BJN2002677.
4. Bigliardia B., Galatib F. Innovation trends in the food industry: The case of functional foods. Trends in Food Science & Technology 2013; 31(2):118-129. DOI: 10.1016/j.tifs.2013.03.006.
5. Полонский В.И. Биологическая роль и польза для здоровья бетаина в зерновых культурах (обзор) // Вестник КрасГАУ. 2020. № 1. С. 53–61
6. Labrecque J., Doyon M., Bellavance F., Kolodinski J. Acceptance of Functional Foods: A Comparison of French, French Canadian Consumers. // Canadian Journal of Agricultural Economics. 2006. 54 (4). P. 647–661.
7. Медеяева А.Ю. Сортимент овощных культур для создания продуктов питания функционального назначения. Мичуринск: Мичуринский ГАУ, 2020. 159 с.
8. Shahidi F. Nutraceuticals and functional foods: Whole versus processed foods. // Trends in Food Science & Technology. 2009. 20(9). P. 376–387. DOI:10.1016/j.tifs.2008.08.004.
9. ГОСТ Р 54059-2010. Продукты пищевые функциональные. Ингредиенты пищевые функциональные. Классификация и общие требования. М., 2010. 12 с.
10. Martirosyan D.M., Singh J. A new definition of functional food by FFC: what makes a new definition unique? // Functional Foods in Health and Disease. 2015. 5(6). P. 209–223. DOI: 10.31989/ffhd.v5i6. 183.
11. Itoh H. Functional Plants. // Plant Factory Using Artificial Light. 2019. P. 143–154. DOI: 10.1016/B978-0-12-813973-8.00013-0.
12. Wada T. Optimization of Growth Environment and Development of Technology to Control the Concentration of Functional Components // Plant Factory Using Artificial Light. 2019. P. 121–130. DOI: 10.1016/B978-0-12-813973-8.00012-9.
13. Nicole C.C.S., Charalambous F., Martinakos S., S. van de Voort, Li Z., Verhoog M., Krijn M. Lettuce growth and quality optimization in a plant factory // Acta Horticulturae. 2016. 1134. P. 231–238.
14. Besten J. Vertical Farming Development; the Dutch Approach. // Plant Factory Using Artificial Light. 2019. P. 307–317. DOI: 10.1016/B978-0-12-813973-8.00027-0.
15. Nicole C.C.S., Mooren J., Pereira Terra A.T., Larsen D.H., Woltering E.J., Marcelis L.F.M., Verdonk J., Schouten R., Troost F. Effects of LED lighting recipes on postharvest quality of leafy vegetables grown in a vertical farm // Acta Horticulturae. 2019. 1256. P. 481–488.
16. Ntagkas N., R.C.H. de Vos, Woltering E.J., Nicole C.C.S., Labrie C., Leo F.M. Marcelis Modulation of the Tomato Fruit Metabolome by LED Light // Metabolites. 2020. № 10(266). P. 1–19. DOI:10.3390/metabo10060266.
17. Xiaoli C., Qichang Y., Xin Z., Taiguang M., Wenzhong G., Xuzhang X. Effects of green LED light on the growth and quality of lettuce // Scientia Agricultura Sinica. 2017. 50(21). P. 4170–4177.

18. Chow K.K. Preliminary study of green LED on lettuce growth under indoor artificial light cultivation. // *Acta Hort.* 2020. 1271. P. 107–114. DOI: 610.17660/ActaHortic.2020.1271.15.
19. Tanigaki Y., Fukuda H. Control Theory in the Metabolic Rhythms of Plants // *Plant Factory Using Artificial Light*. 2019. P. 89–98. DOI: 10.1016/B978-0-12-813973-8.00009-9.
20. Choi H.G. Moon B.Y. Kang N.J. Effects of LED light on the production of strawberry during cultivation in a plastic greenhouse and in a growth chamber // *Sci. Hortic.* 2015. 189. P. 22–31. DOI: 10.1016/j.scienta.2015.03.022.
21. Lee M.K., Arasu M.V., Park S., Byeon D.H., Chung S.O., Park S.U., Lim Y.P., Kim S.J. LED lights enhance metabolites and antioxidants in chinese cabbage and kale. // *Braz. Arch. Biol. Technol.* 2016. 59. 146–161. DOI: 10.1590/1678-4324-2016150546.
22. Hasan Md. M., Bashir T., Ghosh R., Lee S.L., Bae H. An Overview of LEDs' Effects on the Production of Bioactive Compounds and Crop Quality // *Molecules*. 2017. 22(9). 14–20. DOI: 10.3390/molecules22091420.
7. Medeljaeva A.Ju. Sortiment ovoshnyh kul'tur dlja sozdanija produktov pitanija funkcional'nogo naznachenija. Michurinsk: Michurinskij GAU, 2020. 159 c.
8. Shahidi F. Nutraceuticals and functional foods: Whole versus processed foods. // *Trends in Food Science & Technology*. 2009. 20(9). P. 376–387. DOI: 10.1016/j.tifs.2008.08.004.
9. GOST R 54059-2010. Produkty pishhevye funkcional'nye. Ingredijenty pishhevye funkcional'nye. Klassifikacija i obshhie trebovanija. M., 2010. 12 c.
10. Martirosyan D.M., Singh J. A new definition of functional food by FFC: what makes a new definition unique? // *Functional Foods in Health and Disease*. 2015. 5(6). P. 209–223. DOI: 10.31989/ffhd.v5i6.183.
11. Itoh H. Functional Plants. // *Plant Factory Using Artificial Light*. 2019. P. 143–154. DOI: 10.1016/B978-0-12-813973-8.00013-0.
12. Wada T. Optimization of Growth Environment and Development of Technology to Control the Concentration of Functional Components // *Plant Factory Using Artificial Light*. 2019. P. 121–130. DOI: 10.1016/B978-0-12-813973-8.00012-9.
13. Nicole C.C.S., Charalambous F., Martinakos S., S. van de Voort, Li Z., Verhoog M., Krijn M. Lettuce growth and quality optimization in a plant factory // *Acta Horticulturae*. 2016. 1134. P. 231–238.
14. Besten J. Vertical Farming Development; the Dutch Approach. // *Plant Factory Using Artificial Light*. 2019. P. 307–317. DOI: 10.1016/B978-0-12-813973-8.00027-0.
15. Nicole C.C.S., Mooren J., Pereira Terra A.T., Larsen D.H., Woltering E.J., Marcelis L.F.M., Verdonk J., Schouten R., Troost F. Effects of LED lighting recipes on postharvest quality of leafy vegetables grown in a vertical farm // *Acta Horticulturae*. 2019. 1256. P. 481–488.
16. Ntagkas N., R.C.H. de Vos, Woltering E.J., Nicole C.C.S., Labrie C., Leo F.M. Marcelis Modulation of the Tomato Fruit Metabolome by LED Light // *Metabolites*. 2020. № 10(266). P. 1–19. DOI: 10.3390/metabo10060266.
17. Xiaoli C., Qichang Y., Xin Z., Taiguang M., Wenzhong G., Xuzhang X. Effects of green LED light on the growth and quality of lettuce //

Literatura

1. Gruda N., Tanny J. Protected Crops. // *Horticulture: Plants for People and Places*. 2014. № 1. P. 327–405.
2. United Nations Food and Agriculture Organization (FAO). OECD-FAO Agricultural Outlook 2018–2027. 2018. DOI: 10.1787/agr_outlook-2018-en.
3. Roberfroid M.B. Global view on functional foods: European perspectives // *British Journal of Nutrition*. 2002. 88(2). Pp.133–138. DOI: 10.1079/BJN2002677.
4. Bigliardia B., Galatib F. Innovation trends in the food industry: The case of functional foods. *Trends in Food Science & Technology* 2013; 31(2):118-129. DOI: 10.1016/j.tifs.2013.03.006.
5. Polonskij V.I. Biologicheskaja rol' i pol'za dlja zdorov'ja betaina v zernovyh kul'turah (obzor) // *Vestnik KrasGAU*. 2020. № 1. S. 53–61
6. Labrecque J., Doyon M., Bellavance F., Kolodinski J. Acceptance of Functional Foods: A Comparison of French, French Canadian Consumers. // *Canadian Journal of Agricultural Economics*. 2006. 54 (4). P. 647–661.

- Scientia Agricultura Sinica. 2017. 50(21). P. 4170–4177.
18. *Chow K.K.* Preliminary study of green LED on lettuce growth under indoor artificial light cultivation. // *Acta Hortic.* 2020. 1271. P. 107–114. DOI: 10.17660/ActaHortic.2020.1271.15.
19. *Tanigaki Y., Fukuda H.* Control Theory in the Metabolic Rhythms of Plants // *Plant Factory Using Artificial Light.* 2019. P. 89–98. DOI: 10.1016/B978-0-12-813973-8.00009-9.
20. *Choi H.G. Moon B.Y. Kang N.J.* Effects of LED light on the production of strawberry during cultivation in a plastic greenhouse and in a growth chamber // *Sci. Hortic.* 2015. 189. P. 22–31. DOI: 10.1016/j.scienta.2015.03.022.
21. *Lee M.K., Arasu M.V., Park S., Byeon D.H., Chung S.O., Park S.U., Lim Y.P., Kim S.J.* LED lights enhance metabolites and antioxidants in chinese cabbage and kale. // *Braz. Arch. Biol. Technol.* 2016. № 59. P. 146–161. DOI: 10.1590/1678-4324-2016150546.
22. *Hasan Md. M., Bashir T., Ghosh R., Lee S.L., Bae H.* An Overview of LEDs' Effects on the Production of Bioactive Compounds and Crop Quality // *Molecules.* 2017. 22(9). 14–20. DOI: 10.3390/molecules22091420.

