

## ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ НА СОСТОЯНИЕ КОМПЛЕКСА ФОТОСИНТЕЗИРУЮЩИХ ПИГМЕНТОВ МИКРОЗЕЛЕНИ КАПУСТЫ БЕЛОКОЧАННОЙ

**А. М. ПАШКЕВИЧ, А. И. ЧАЙКОВСКИЙ**

*РУП «Институт овощеводства»,  
аг. Самохваловичи, Республика Беларусь, 223013*

**Ж. А. РУПАСОВА, В. С. ЗАДАЛЯ**

*ГНУ «Центральный ботанический сад НАН Беларуси»,  
г. Минск, Республика Беларусь, 220012*

*(Поступила в редакцию 29.03.2022)*

*Приведены результаты исследования влияния продолжительности светодиодного освещения (8, 10, 12, 14, 16 час) на содержание в образцах микрозелени капусты белокочанной фотосинтезирующих пигментов (хлорофиллов а и b, β-каротина и ксантофиллов). Установлено, что сокращение продолжительности фотопериода до 8–10 час. способствовало усилению накопления в ней и хлорофиллов, и каротиноидов по сравнению с 12-часовой экспозицией, выбранной в качестве контроля, наиболее значительно при 8-часовом освещении, тогда как при ее увеличении до 14 и 16 час. наблюдался обратный эффект – снижение содержания обеих групп пластидных пигментов, наибольшее при 16-часовом освещении. Показано, что активизация накопления каротиноидов при 8- и 10-часовой экспозициях обусловлена усилением биосинтеза и β-каротина, и ксантофиллов, наиболее выраженным в первом случае. С увеличением же продолжительности воздействия светодиодного освещения на опытные растения до 14 и 16 час. наблюдалось обогащение их β-каротином относительно 12-часовой экспозиции при обеднении ксантофиллами. Установлено, что наиболее насыщенным фондом фотосинтезирующих пигментов в рамках эксперимента характеризовались образцы микрозелени капусты при 10- и особенно при 8-часовой продолжительности светодиодного освещения, тогда как наиболее обедненным – при 14- и особенно при 16-часовой.*

**Ключевые слова:** микрозелень, белокочанная капуста, фотосинтезирующие пигменты, хлорофиллы, каротиноиды, продолжительность освещения, светодиоды.

*The results of studying the effect of the duration of LED illumination (8, 10, 12, 14, 16 hours) on the content of photosynthetic pigments (chlorophylls a and b, β-carotene and xanthophylls) in cabbage microgreen samples are presented. It has been established that a reduction in the duration of photoperiod to 8–10 h. contributed to an increase in the accumulation of both chlorophylls and carotenoids in it compared with the 12-hour exposure, selected as control, the most significant at 8-hour illumination, while when it was increased to 14 and 16 hours, the reverse effect was observed – a decrease in the content of both groups of plastid pigments, the largest at 16-hour illumination. It has been shown that the activation of carotenoid accumulation at 8- and 10-hour exposures is due to an increase in the biosynthesis of both β-carotene and xanthophylls, which is most pronounced in the first case. With an increase in the duration of exposure to LED lighting on experimental plants up to 14 and 16 hours, their enrichment in β-carotene was observed relative to a 12-hour exposure when they were depleted in xanthophylls. It was found that the most saturated fund of photosynthetic pigments in the experiment was characterized by samples of cabbage microgreens at 10 and especially at 8 hours of LED lighting, while the most depleted – at 14 and especially at 16 hours.*

**Key words:** microgreens, white cabbage, photosynthetic pigments, chlorophylls, carotenoids, illumination duration, LEDs.

### **Введение**

В последние годы у населения республики существенно увеличился спрос на продукцию микрозелени овощных культур, в том числе капусты белокочанной, как источника широкого спектра полезных веществ. Вместе с тем значительную роль при ее выращивании в условиях закрытой контролируемой среды играет уровень освещения, являющийся сигналом к росту и развитию растений и одновременно источником энергии для реализации метаболических процессов [1]. При этом ответная реакция растительного организма при адаптации к условиям световой среды проявляется не только в изменениях морфофизиологических показателей, но и в перестройке его светособирающего комплекса [2]. Наиболее важными характеристиками светового режима являются спектральный состав и плотность потока фотонов (интенсивность излучения), но особенно важна продолжительность освещения (фотопериод), играющая первостепенную роль в накоплении фитомассы и синтезе вторичных метаболитов [3]. В мировой практике при производстве микрозелени овощных культур широко используются искусственные источники освещения – светодиоды. Однако видоспецифичный и даже сортоспецифичный характер требований культиваров к условиям освещения обусловил необходимость в проведении исследований по оптимизацию их светового режима, обеспечивающего высокие биопродукционные и биохимические характеристики конечной продукции [4–9]. Тем не менее в зарубежной научной литературе информация по данному вопросу носит весьма ограниченный характер, а в отечественной она отсутствует вовсе.

На наш взгляд, важнейшим критерием ответной реакции растений на условия освещения является характер соответствующих изменений в пигментном комплексе пластид ассимилирующих органов. С целью установления влияния продолжительности светодиодного освещения на основные характеристики фонда фотосинтезирующих пигментов микрозелени капусты белокочанной, в 2020–2021 гг. в РУП «Институт овощеводства» был проведен производственный эксперимент при ее выращивании в условиях светокультуры в фитотроне, оснащённом облучательной фитоустановкой стеллажного типа FLORA LED 300/2/4, предоставленной Государственным научно-производственным унитарным предприятием «Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий НАН Беларуси». Установка оснащена десятью светодиодными светильниками ДСП08-3x12-004 УХЛ4 при продолжительности освещения 8, 10, 12, 14 и 16 час. В качестве контроля было принято значение фотопериода, равное 12 час.

Исследование пигментного фонда микрозелени капусты белокочанной (гибрид *Аватар F1*) осуществляли в лаборатории химии растений Центрального ботанического сада НАН Беларуси с использованием следующих методов. В свежих усредненных пробах растительного материала определяли содержание фотосинтезирующих пигментов – хлорофиллов *a* и *b* по методу Т.Н. Годнева [10, 11],  $\beta$ -каротина и суммы каротиноидов – по ГОСТ 8756.22-80 [12]; сухих веществ – по ГОСТ 31640-2012 [13]. Все измерения и определения выполнены в 2-кратной биологической и 3-кратной аналитической повторности с последующей статистической обработкой экспериментальных данных по методике, принятой для биологических исследований с использованием программы *Microsoft Office Excel 2007*.

### Основная часть

Повариантный анализ состояния пигментного фонда пластид микрозелени капусты показал, что суммарное содержание хлорофиллов в ее сухой массе было достаточно высоким и изменялось в рамках эксперимента в весьма широком диапазоне, составлявшем 338,7–492,7 мг/100 г, в том числе хлорофилла *a* – 235,8–340,6 мг/100 г, хлорофилла *b* – 102,9–152,1 мг/100 г (табл. 1).

Таблица 1. Содержание хлорофиллов и каротиноидов (мг на 100 г сухой массы) в микрозелени капусты белокочанной при разной продолжительности светодиодного освещения

Продолжительность освещения	Хлорофиллы					
	<i>a</i>			<i>b</i>		
	$\bar{x} \pm s_x$	<i>t</i>		$\bar{x} \pm s_x$	<i>t</i>	
12 час. – Контроль	265,8±1,8			125,8±2,7		
8 час.	340,6±1,4	32,5*		152,1±3,4	6,1*	
10 час.	305,7±0,2	21,7*		131,7±2,2	3,4*	
14 час.	252,8±0,9	-6,4*		105,9±0,2	-7,2*	
16 час.	235,8±0,4	-16,1*		102,9±1,9	-6,9*	
	a+b			a/b		
	$\bar{x} \pm s_x$	<i>t</i>		$\bar{x} \pm s_x$	<i>t</i>	
12 час. – Контроль	391,6±0,9			2,1±0,1		
8 час.	492,7±4,8	20,9*		2,2±0,1	1,7	
10 час.	437,4±3,3	13,2*		2,3±0,1	2,9*	
14 час.	358,8±0,7	-28,2*		2,4±0,1	4,4*	
16 час.	338,7±2,3	-21,8*		2,3±0,1	2,5	
	Каротиноиды					
	сумма			$\beta$ -каротин		
	$\bar{x} \pm s_x$	<i>t</i>		$\bar{x} \pm s_x$	<i>t</i>	
12 час. – Контроль	90,6±0,2			32,7±0,5		
8 час.	108,5±0,6	29,7*		44,6±0,3	20,9*	
10 час.	103,3±0,4	29,0*		43,2±0,6	13,4*	
14 час.	82,2±0,2	-29,0*		49,5±0,5	24,6*	
16 час.	76,3±0,6	-22,6*		43,7±0,1	22,1*	
	ксантофиллы		$\beta$ -каротин/ксантофиллы		Хлорофиллы/Каротиноиды	
	$\bar{x} \pm s_x$	<i>t</i>	$\bar{x} \pm s_x$	<i>t</i>	$\bar{x} \pm s_x$	<i>t</i>
12 час. – Контроль	57,9±0,7		0,6±0,02		4,3±0,1	
8 час.	63,9±0,9	5,3*	0,7±0,01	6,4*	4,5±0,1	3,2*
10 час.	60,1±0,8	2,8*	0,7±0,02	5,8*	4,2±0,1	-2,5
14 час.	32,7±0,7	-25,9*	1,5±0,05	19,9*	4,4±0,1	2,5
16 час.	32,7±0,7	-25,5*	1,3±0,03	22,3*	4,4±0,1	1,8

\* – Статистически значимые по t-критерию Стьюдента различия с контролем при  $p < 0,05$ .

При этом суммарное содержание каротиноидов в сухом веществе микрозелени капусты варьировалось в рамках эксперимента от 76,3 до 108,5 мг/100 г, в том числе  $\beta$  – каротина – от 32,7 до 49,5 мг/100 г, ксантофиллов – от 32,7 до 63,9 мг/100 г. Заметим, что максимальное общее количество как зеленых, так и желтых фотосинтезирующих пигментов в образцах микрозелени капусты установлено при 10- и особенно 8-часовой продолжительности светодиодного освещения, тогда как минимальное – при 14- и особенно при 16-часовой. Вместе с тем производные характеристики пигментного фонда пластид – соотношения количеств хлорофиллов *a* и *b*, хлорофиллов и каротиноидов слабо зависели от исследуемого фактора, что подтверждалось сравнительной узостью диапазонов их варьирования в рамках эксперимента, соответствовавших значениям 2,1–2,4 и 4,2–4,5, что обусловлено более высокой генетической детерминированностью данных показателей по сравнению с количественными параметрами накопления фотосинтезирующих пигментов. Что касается соотношения количеств  $\beta$ -каротина и ксантофиллов, то диапазон его варьирования соответствовал области 0,6–1,5, причем при продолжительности светодиодного освещения в пределах 8–12 ч значения данного показателя были сопоставимы между собой, составляя 0,6–0,7, что свидетельствовало о приоритетной роли ксантофиллов в каротиноидном комплексе микрозелени в этих вариантах опыта. При увеличении же длительности фотопериода значения указанного соотношения уже достигали 1,3–1,5, особенно в варианте с 14-часовой его продолжительностью освещения, что указывало на усиление в их каротиноидном комплексе позиций наиболее ценного его компонента –  $\beta$ -каротина.

Сопоставление анализируемых характеристик пигментного фонда микрозелени капусты в контроле и в вариантах опыта с разной продолжительностью светодиодного освещения выявило существенные различия как в содержании, так и в соотношении его основных компонентов. Как следует из табл. 2, при сокращении длительности воздействия исследуемого фактора на растения до 8–10 час. наблюдалось более активное, чем в контроле, накопление в них и зеленых, и желтых пластидных пигментов.

Таблица 2. Относительные различия с контролем вариантов опыта с разной продолжительностью светодиодного освещения по содержанию хлорофиллов и каротиноидов в сухом веществе микрозелени капусты белокочанной, %

Продолжительность освещения	Хлорофиллы				Хлорофиллы + Каротиноиды	Совокупный эффект*)
	a	b	a+b	a÷b		
1	2	3	4	5		
8 час.	+28,1	+20,9	+25,8	-		
10 час.	+15,0	+4,7	+11,7	+9,5		
14 час.	-4,9	-15,8	-8,4	+14,3		
16 час.	-11,3	-18,2	-13,5	-		
	Каротиноиды					
	сумма	$\beta$ -каротин	ксантофиллы	$\beta$ -карот. ÷ ксантофиллы		
8 час.	+19,8	+36,4	+10,4	+16,7	+4,7	+141,4
10 час.	+14,0	+32,1	+3,8	+16,7	-	+81,3
14 час.	-9,3	+51,4	-43,5	+150,0	-	-30,5
16 час.	-15,8	+33,6	-43,5	+116,7	-	-68,7

Примечание. Прочерк (–) означает отсутствие статистически значимых по t-критерию Стьюдента различий с контролем при  $p < 0,05$ ; \*) – Совокупный эффект установлен путем сложения данных столбцов 2, 3, 4, 6, 7 и 8, с учетом их знака.

Это подтверждалось весьма заметным превышением контрольного уровня накопления в них и хлорофиллов, и каротиноидов соответственно на 12–26 % и 14–20 %, наибольшим при 8-часовом освещении. Вместе с тем при увеличении продолжительности освещения до 14 и 16 час наблюдался обратный эффект – снижение содержания обеих групп пластидных пигментов относительно контроля соответственно на 8–14 % и 9–16 %, наиболее значительное при 16-часовом освещении.

Заметим, что только на фоне 10- и 14-часового фотопериода темпы биосинтеза хлорофилла *a* превышали таковые хлорофилла *b* по сравнению с контролем, что подтверждалось на 10 и 14 % более высоким соотношением их количеств при отсутствии достоверных различий в этом плане при 8- и 16-часовом освещении. Более высокое, чем в контроле, содержание каротиноидов в микрозелени капусты при 8- и 10-часовой продолжительности освещения было обусловлено активизацией накопления как  $\beta$ -каротина, так и ксантофиллов, соответственно на 32–36 % и 4–10 %, наиболее выраженной в первом случае (табл. 2). С увеличением же времени воздействия освещения на опытные растения до 14 и 16 ч наблюдалось обогащение их  $\beta$ -каротином соответственно на 51 и 34 % по сравнению с контролем, сопряженное в обоих случаях с обеднением на 44 % ксантофиллами, что привело к весьма

значительному увеличению соотношения их количеств. Вместе с тем, несмотря на показанные выше межвариантные различия в пигментном комплексе пластид микрозелени капусты, продолжительность светодиодного освещения не оказала значимого влияния на темпы биосинтеза хлорофиллов и каротиноидов, что подтверждалось отсутствием различий опытных вариантов с контролем в соотношении содержания хлорофиллов и каротиноидов (табл. 2). Лишь при 8-часовой экспозиции данный показатель оказался незначительно (не более чем на 5 %) достоверно выше, что указывало на преимущественное усиление в этом случае биосинтеза зеленых пигментов.

Таким образом, выявленные межвариантные различия в составе пигментного комплекса пластид микрозелени капусты свидетельствовали о существенном влиянии исследуемого фактора на его формирование. С целью выявления продолжительности светодиодного освещения, обеспечивающей максимальное и минимальное накопление фотосинтезирующих пигментов по сравнению с контролем, для каждого варианта опыта были определены суммарные значения относительных размеров положительных и отрицательных различий с последним по общему количеству хлорофиллов и каротиноидов, а также по содержанию основных форм данных пигментов. Возвращаясь к табл. 2, нетрудно убедиться, что только при 8- и в меньшей степени 10-часовой продолжительности светодиодного освещения были установлены на 81–141 % более высокие, чем при 12-часовой, принятой в качестве контроля, значения совокупности обозначенных признаков, что свидетельствовало о большей насыщенности пигментного фонда опытных образцов фотосинтезирующими пигментами. На наш взгляд, это указывало на более значительные, чем у контрольных растений, потенциальные возможности микрозелени капусты к осуществлению синтетических процессов в этих вариантах опыта. Вместе с тем при увеличении продолжительности освещения до 14 и 16 час. были установлены на 31 и 69 % более низкие, чем в контроле, значения данного показателя, что однозначно свидетельствовало об ослаблении фотосинтетической функции у растений этих вариантов опыта.

В соответствии со снижением данного показателя, указывающим на обеднение пигментного фонда микрозелени капусты под действием исследуемого фактора, было проведено распределение вариантов опыта с разной продолжительностью светодиодного освещения следующим образом:

8 часов > 10 часов > 12 часов > 14 часов > 16 часов

#### **Заключение**

В результате исследования влияния продолжительности светодиодного освещения (8, 10, 12, 14, 16 ч) на содержание в образцах микрозелени капусты белокочанной (гибрид *Аватар F1*) фотосинтезирующих пигментов (хлорофиллов *a* и *b*,  $\beta$ -каротина и ксантофиллов) установлено, что сокращение продолжительности фотопериода до 8–10 часов способствовало усилению накопления в ней и хлорофиллов, и каротиноидов по сравнению с 12-часовой экспозицией, выбранной в качестве контроля, наиболее значительному при 8-часовом освещении, тогда как при ее увеличении до 14 и 16 ч наблюдался обратный эффект – снижение содержания обеих групп пластидных пигментов, особенно при 16-часовом освещении. Показано, что активизация накопления каротиноидов при 8- и 10-часовой экспозициях обусловлена усилением биосинтеза и  $\beta$ -каротина, и ксантофиллов, наиболее выраженным в первом случае. С увеличением же продолжительности воздействия светодиодного освещения на опытные растения до 14 и 16 ч наблюдалось обогащение их  $\beta$ -каротином относительно 12-часовой экспозиции при обеднении ксантофиллами.

Установлено, что наиболее насыщенным фондом фотосинтезирующих пигментов в рамках эксперимента характеризовались образцы микрозелени капусты при 10- и особенно при 8-часовой продолжительности светодиодного освещения, тогда как наиболее обедненным – при 14- и особенно при 16-часовой.

#### *ЛИТЕРАТУРА*

1. Meng, Q. Substituting green or far-red radiation for blue radiation induces shade avoidance and promotes growth in lettuce and kale/ Q. Meng, N. Kelly, E. S. Runkle. – Environmental and Experimental Botany, 2019. – Vol. 162. – P. 383–391.
2. Анисимов, А. А. Влияние узкополосного красно-синего освещения на пигментный комплекс некоторых декоративных растений / А. А. Анисимов // Перспективы развития АПК в работах молодых ученых: материалы региональной научно-практической конференции молодых ученых, Тюмень, 5 февраля 2014 г. / Государственный аграрный университет Северного Зауралья; редкол.: О. М. Шевелёва (гл. ред.) [и др.]. – Тюмень, 2014. – С. 8–12.
3. Оптимизация светодиодной системы освещения витаминной космической оранжереи / Авиакосмическая и экологическая медицина, 2016. – Т. 50, № 3. – С. 17–23.
4. A review on the effects of light-emitting diode (LED) light on the nutrients of sprouts and microgreens / X. Zhang [et al.]. – Trends in Food Science & Technology, 2020. – Vol. 99. – P. 1–15.

5. Blue and Red LED Illumination Improves Growth and Bioactive Compounds Contents in Acyanic and Cyanic *Ocimum basilicum* L. microgreens / Z. Andrei [et al.]. – *Molecules*, 2017. – Vol. 22. – № 2111. – P. 1–14.
6. Brazaitytė, A. Changes in mineral element content of microgreens cultivated under different lighting conditions in a greenhouse/ A. Brazaitytė, V. Vaštakaitė-Kairienė, A. Viršilė. – *Acta Horticulturae*, 2018. – Vol. 1227. – P. 507–516.
7. Comparison of LED and HPS illumination effects on cultivation of red pak choi microgreens under indoors and greenhouse conditions / A. Brazaitytė [et al.]. – Istanbul, Turkey: 30th International Horticultural Congress, 2020 –Vol. 1287. – P. 395–402.
8. Kong, Y. Growth and morphology responses to narrow-band blue light and its co action with low-level UVB or green light: A comparison with red light in four microgreen species. *Environmental and Experimental Botany* / Y. Kong, Y. Zheng, 2020. – Vol.178. – № 104189. – P. 1–11.
9. Light Intensity and Light quality from Sole-source Light-emitting Diodes Impact Phytochemical Concentrations within Brassica Microgreens / J. Craver [et al.]. – *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 2017. – Vol. 142. – № 1. – P. 3–12.
10. Годнев, Т. Н. Хлорофилл: его строение и образование в растении / Т. Н. Годнев. – Минск: Изд-во Акад. наук БССР, 1963. – 318 с.
11. Фотосинтез. Методические рекомендации к лабораторным занятиям, задания для самостоятельной работы и контроля знаний студентов / авт.-сост. Л. В. Кахнович. – Минск: Изд-во Белорус. гос. ун-та, 2003. – 88 с.
12. Продукты переработки плодов и овощей. Метод определения каротина: ГОСТ 8756.22-80. Введ. 01.01.81. Дата последнего изменения 13.07.2017 – М.: Изд-во стандартов, 2010. – 6 с.
13. Методы определения сухих веществ: ГОСТ 8756.2-82. – Введен 01.01.1983. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 5 с.