

ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ НА СОСТОЯНИЕ КОМПЛЕКСА ФОТОСИНТЕЗИРУЮЩИХ ПИГМЕНТОВ МИКРОЗЕЛЕНИ КАПУСТЫ БЕЛОКОЧАННОЙ И ГОРОХА ОВОЩНОГО

А. М. ПАШКЕВИЧ, А. И. ЧАЙКОВСКИЙ

РНИДУП «Институт плодородства»,
аг. Самохваловичи, Республика Беларусь, 223013

Ж. А. РУПАСОВА, В. С. ЗАДАЛЯ, Л. В. ГОНЧАРОВА, П. Н. БЕЛЫЙ, Т. В. ШПИТАЛЬНАЯ

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

Ю. В. ТРОФИМОВ

РНПУП «Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий НАН Беларуси»,
г. Минск, Республика Беларусь

(Поступила в редакцию 19.09.2022)

За последние годы во всем мире наблюдается устойчивое повышение интереса общества к здоровым и сбалансированным продуктам питания. Микрозелень капусты белокочанной и гороха овощного в этом отношении является источником широкого спектра полезных веществ и отличается более высоким их содержанием, по сравнению с аналогичными товарными овощами. Вместе с тем информация о технологических аспектах выращивания, к которым, в первую очередь, относятся интенсивность освещения, об их связи с хлорофиллами *a* и *b*, β -каротином и ксантофиллами микрозелени промышленных сортов и гибридов овощных культур недостаточна. По этой причине особую актуальность обретает выявление оптимальной интенсивности светодиодного освещения в культуре микрозелени капусты белокочанной и гороха овощного, обеспечивающей наиболее высокое накопление комплекса фотосинтезирующих пигментов и определяющих вкусовые качества данной продукции. Приведены результаты исследования влияния интенсивности светодиодного освещения (50, 100, 150, 200 и 250 мкм/м² сек) на содержание в образцах микрозелени капусты белокочанной и гороха овощного хлорофиллов *a* и *b*, β -каротина и ксантофиллов. Установлено, что наиболее насыщенным фондом фотосинтезирующих пигментов в рамках эксперимента характеризовались образцы микрозелени капусты при интенсивности светодиодного освещения 100 и особенно 50 мкм/м²сек, тогда как наиболее обедненным – при 250 и особенно при 150 мкм/м²сек. В отличие от микрозелени капусты, наиболее насыщенным фондом фотосинтезирующих пигментов характеризовались образцы микрозелени гороха при интенсивности светодиодного освещения 150 и в большей степени 100 мкм/м²сек, тогда как наиболее обедненным – при 50 и особенно при 200 мкм/м²сек, выбранной в качестве контроля.

Ключевые слова: микрозелень, белокочанная капуста, горох овощной, фотосинтезирующие пигменты, хлорофиллы, каротиноиды, интенсивность освещения, светодиоды.

In recent years, there has been a steady increase in public interest in healthy and balanced foods around the world. Microgreens of white cabbage and vegetable peas in this respect are a source of a wide range of useful substances and are distinguished by their higher content compared to similar commercial vegetables. At the same time, information on the technological aspects of cultivation, which primarily includes the intensity of illumination, on their relationship with chlorophylls *a* and *b*, β -carotene and xanthophylls of microgreens of industrial varieties and hybrids of vegetable crops, is insufficient. For this reason, the identification of the optimal intensity of LED lighting in the culture of microgreen cabbage and vegetable peas, which provides the highest accumulation of a complex of photosynthetic pigments and determines the taste of these products, is of particular relevance. The results of studying the effect of LED illumination intensity (50, 100, 150, 200 and 250 $\mu\text{m}^2/\text{sec}$) on the content of chlorophylls *a* and *b*, β -carotene and xanthophylls in microgreen samples of white cabbage and vegetable peas are presented. It was found that the most saturated stock of photosynthetic pigments in the experiment was present in samples of cabbage microgreens at an LED illumination intensity of 100 and especially 50 $\mu\text{m}^2/\text{s}$, while the most depleted at 250 and especially at 150 $\mu\text{m}^2/\text{s}$. In contrast to cabbage microgreens, samples of pea microgreens were characterized by the most saturated fund of photosynthetic pigments at an LED illumination intensity of 150 and, to a greater extent, 100 $\mu\text{m}^2/\text{s}$, while the most depleted was at 50 and especially at 200 $\mu\text{m}^2/\text{s}$, which was chosen as a control.

Key words: microgreens, white cabbage, vegetable peas, photosynthetic pigments, chlorophylls, carotenoids, light intensity, LEDs.

Введение

В связи со значительным увеличением в последние годы спроса у населения республики на продукцию микрозелени овощных культур, в том числе капусты белокочанной и гороха овощного, как источника широкого спектра полезных веществ, особую актуальность обретает совершенствование технологии ее производства, направленное на улучшение производственных и качественных показателей. Общеизвестно, что важнейшую роль при выращивании микрозелени в контролируемых условиях защищенного грунта играет световой режим, одной из основных характеристик которого является плотность потока фотонов, определяющая интенсивность излучения [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], находящей свое отражение в соответствующей трансформации фонда фотосинтезирующих пигментов.

тов ассимилирующих органов. С целью установления влияния интенсивности светодиодного освещения на его основные характеристики, в образцах микрозелени капусты белокочанной и гороха овощного в 2022 г. в РУП «Институт овощеводства» были проведены производственные эксперименты с использованием ряда режимов светодиодного освещения при выращивании данной продукции.

Основная часть

Исследования выполнены в условиях светокультуры с использованием светодиода (FLORA LED 300/2/4 производства РНПУП «Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий НАН Беларуси») при интенсивности освещения 50, 100, 150, 200 и 250 мкм/м² сек (мкм/ м² сек). В качестве контроля было принято значение интенсивности освещения, равное 200 мкм/м² сек, рекомендуемое Институтом Гипронисельпром Министерства сельского хозяйства РФ в качестве оптимального для зеленых и рассады ряда овощных культур.

Исследование пигментного фонда микрозелени капусты белокочанной на примере гибрида *Avatar 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 [3, 4], β -каротина и суммы каротиноидов – по ГОСТ 8756.22-80 [5]; сухих веществ – по ГОСТ 31640-2012 [6]. 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*.

Повариантный анализ состояния пигментного фонда пластид микрозелени капусты белокочанной, результаты которого приведены в табл. 1, показали, что суммарное содержание хлорофиллов в ее сухой массе было достаточно высоким и изменялось в рамках эксперимента в весьма широком диапазоне – 524,3–835,8 мг/100 г, в том числе хлорофилла *a* – 389,3–588,8 мг/100 г, хлорофилла *b* – 135,0–247,0 мг/100 г. При этом суммарное содержание каротиноидов варьировалось от 141,2 до 202,9 мг/100 г, в том числе β -каротина – от 39,8 до 63,8 мг/100 г, ксантофиллов – от 95,9 до 139,8 мг/100 г. Обращает на себя внимание, что максимальное количество как зеленых, так и желтых фотосинтезирующих пигментов в исследуемых образцах установлено при интенсивности светодиодного освещения 50 мкм/м² сек., тогда как минимальное – при 150 мкм/м² сек.

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

Интенсивность освещения, мкм/м ² сек	a		b		Хлорофиллы				a/b	
	$\bar{x} \pm s_x$	t	$\bar{x} \pm s_x$	t	a+b				$\bar{x} \pm s_x$	t
	$\bar{x} \pm s_x$	t	$\bar{x} \pm s_x$	t	$\bar{x} \pm s_x$	t	$\bar{x} \pm s_x$	t	$\bar{x} \pm s_x$	t
200 – Контроль	481,7 ±0,5		237,1±1,7		718,8±2,2				2,0±0,1	
50	588,8 ±2,4	43,0*	247,0±1,7	4,1*	835,8±4,2		24,8*		2,4±0,1 24,8*	
100	519,1 ±1,7	20,6*	186,8±2,9	-15,0*	705,8±4,6		-2,5		2,8±0,1 20,8*	
150	389,3 ±5,1	-17,9*	135,0±3,0	-29,4*	524,3±8,2		-23,0*		2,9±0,1 29,0*	
250	436,8 ±12,3	-3,6*	150,6±3,2	-23,8*	586,9±11,0		-11,8*		2,9±0,1 8,1*	
	Каротиноиды									
	сумма		β -каротин		ксантофиллы		β -каротин/ксантоф		Хлорофиллы/Каротиноиды	
	$\bar{x} \pm s_x$	t	$\bar{x} \pm s_x$	t	$\bar{x} \pm s_x$	t	$\bar{x} \pm s_x$	t	$\bar{x} \pm s_x$	t
200 – Контроль	163,9 ±0,2		39,8±0,6		124,1±0,7		0,3±0,01		4,4±0,1	
50	202,9 ±4,0	9,6*	63,1±0,5	31,4*	139,8±3,8	4,0*	0,5±0,01	10,3*	4,1±0,1 -2,8*	
100	183,2 ±3,2	6,1*	63,8±0,4	34,9*	119,4±3,6	-1,3	0,5±0,02	10,5*	3,9±0,1 -5,7*	
150	141,2 ±0,6	-39,5*	45,3±0,5	7,5*	95,9±1,0	-22,4*	0,5±0,01	12,7*	3,7±0,1 -9,0*	
250	150,1 ±1,3	-10,2*	47,2±0,1	13,5*	102,9±1,3	-14,0*	0,5±0,01	16,0*	3,9±0,1 -4,3*	

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

Что касается производных характеристик пигментного фонда пластид – соотношения количеств хлорофиллов *a* и *b*, а также хлорофиллов и каротиноидов, то, несмотря на их более высокую генетическую детерминированность по сравнению с количественными параметрами накопления фотосинте-

зирующих пигментов, для них также была показана отчетливая зависимость от исследуемого фактора. Это подтверждалось весьма широкими диапазонами их варьирования в рамках эксперимента в пределах 2,0–2,9 в первом случае и 3,7–4,4 во втором (табл. 1).

При этом диапазон варьирования соотношения количеств β -каротина и ксантофиллов соответствовал области значений 0,3–0,5, что свидетельствовало о приоритетной роли ксантофиллов в каротиноидном комплексе микрозелени капусты при заметном, причем сходном ее ослаблении по сравнению с контролем в остальных вариантах опыта, что указывало на усиление позиций наиболее ценного его компонента – β -каротина при изменении интенсивности светодиодного освещения.

Сопоставление анализируемых характеристик пигментного фонда микрозелени капусты в контроле и в вариантах опыта с разной степенью влияния исследуемого фактора на опытные растения выявило существенные различия как в содержании, так и в соотношении его основных компонентов.

Как следует из табл. 2, снижение интенсивности освещения до 150 мкм/м²сек относительно контроля (200 мкм/м²сек) приводило к наиболее выраженному в рамках эксперимента обеднению исследуемых образцов зелеными пластидными пигментами на 27 %, особенно хлорофиллом *b*, тогда как ее снижение до 100 мкм/м²сек не оказывало значимого влияния на общее их содержание, что обеспечивалось уравниванием темпов активизации накопления хлорофилла *a* и ослабления такового хлорофилла *b*, сопровождавшимся противоположными по знаку изменениями их содержания соответственно на 8 и 21 %. Однако дальнейшее снижение интенсивности освещения до 50 мкм/м²сек оказывало уже весьма заметное стимулирующее действие на биосинтез обеих форм данных пигментов, особенно хлорофилла *a*, что приводило к обогащению ими микрозелени капусты более чем на 16 % по сравнению с контролем. Увеличение же интенсивности освещения до 250 мкм/м²сек обуславливало сходное с установленным при интенсивности 150 мкм/м²сек обеднение микрозелени капусты хлорофиллами на 18 %, причем во всех рассмотренных случаях негативное воздействие исследуемого фактора на темпы биосинтеза хлорофилла *a* было намного слабее, чем хлорофилла *b*, следствием чего явились весьма выразительные сдвиги соотношения данных форм зеленых пигментов на 20–45 % относительно контроля, наибольшие при интенсивности освещения 150 и 250 мкм/м²сек и наименьшие при интенсивности 50 мкм/м²сек.

Что касается каротиноидов, то в характере изменений их общего содержания в микрозелени капусты в зависимости от исследуемого фактора прослеживались закономерности, аналогичные установленным для хлорофиллов (см. табл. 2). Так, лишь в вариантах опыта с интенсивностью освещения 50 и 100 мкм/м²сек наблюдалось увеличение содержания желтых пигментов на 24 и 12 % относительно контроля при отставании от него на 14 и 8 % в вариантах с интенсивностью 150 и 250 мкм/м²сек.

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

Интенсивность освещения, мкм/м ² сек	Хлорофиллы				Каротиноиды				Хлорофиллы ÷ Каротиноиды	Совокупный эффект*)
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a+b</i>	<i>a÷b</i>	сумма	β -каротин	Ксантофиллы	β -карот. ÷ ксантофиллы		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
50	+22,2	+4,2	+16,3	+20,0	+23,8	+58,5	+12,7	+66,7	-6,8	+137,7
100	+7,8	-21,2	-	+40,0	+11,8	+60,3	-	+66,7	-11,4	+58,7
150	-19,2	-43,1	-27,1	+45,0	-13,9	+13,8	-22,7	+66,7	-15,9	-112,2
250	-9,3	-36,5	-18,4	+45,0	-8,4	+18,6	-17,1	+66,7	-11,4	-71,1

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.

Несмотря на сходство профилирующих тенденций в характере влияния интенсивности светодиодного освещения на содержание в исследуемых образцах зеленых и желтых пластидных пигментов, во всех вариантах опыта темпы биосинтеза хлорофиллов были несколько ниже, а каротиноидов – выше, чем в контроле, что подтверждалось отставанием от него соотношения их количеств на 7–16 %. Заметим, что во всех вариантах опыта в комплексе желтых пигментов отмечена активизация накопления β -каротина на 14–60 % по сравнению с контролем, наиболее значительная при интенсивности освещения 50 и 100 мкм/м²сек, сопровождавшаяся только в первом случае усилением накопления ксантофиллов на 13 %. С увеличением же интенсивности воздействия данного фактора наблюдалось либо нивелирование различий с контролем в содержании данных соединений (100 мкм/м²сек.), либо отставание от него в этом плане на 17–23 % (150 и 250 мкм/м²сек.).

Несмотря на разнонаправленный характер изменения темпов биосинтеза восстановленных и окисленных форм желтых пигментов в зависимости от интенсивности светодиодного освещения, не выявлено межвариантных различий в величине позитивных сдвигов соотношения их количеств относи-

тельно контроля, что указывает на устойчивость качественного состава каротиноидного комплекса микрозелени капусты к исследуемому фактору.

Таким образом, выявленные межвариантные различия в составе пигментного комплекса пластид микрозелени капусты свидетельствовали о существенном влиянии на его формирование интенсивности светодиодного освещения. С целью выявления последней, обеспечившей 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 ним по общему количеству хлорофиллов и каротиноидов, а также по содержанию основных форм данных групп пигментов. Возвращаясь к табл. 2, нетрудно убедиться, что только при снижении интенсивности освещения до 100 и в большей степени до 50 мкм/м²сек. были установлены на 59–138 % более высокие, чем при 200 мкм/м²сек, принятой в качестве контроля, значения совокупности обозначенных признаков, что свидетельствовало о большей насыщенности пигментного фонда продукции данных вариантов опыта. На наш взгляд, это указывало на более значительные, чем у контрольных растений, потенциальные возможности микрозелени данных вариантов опыта к осуществлению в ней синтетических процессов. Вместе с тем при снижении интенсивности освещения до 150 мкм/м²сек установлено наибольшее в эксперименте отставание данного показателя от контроля, что однозначно свидетельствовало о наиболее значительном ослаблении фотосинтетической функции у растений этого варианта опыта. Заметим, что подобное, хотя и менее выраженное отставание от контроля в этом плане установлено и на фоне максимальной интенсивности светодиодного освещения.

В соответствии со снижением совокупного эффекта, указывающим на обеднение пигментного фонда микрозелени капусты под действием исследуемого фактора, было проведено распределение вариантов опыта с разной интенсивностью освещения, выраженной в мкм/м²сек, следующим образом:

$$50 > 100 > 200 > 250 > 150.$$

Таким образом, наиболее насыщенным фондом фотосинтезирующих пигментов в рамках эксперимента характеризовались образцы микрозелени капусты при интенсивности светодиодного освещения 100 и особенно 50 мкм/м²сек, тогда как наиболее обедненным – при 250 и особенно при 150 мкм/м²сек.

Результаты аналогичных исследований с микрозеленью гороха овощного, приведенные в табл. 3, показали, что суммарное содержание хлорофиллов в ее сухой массе варьировалось в рамках эксперимента в диапазоне 589,1–693,1 мг/100 г, в том числе хлорофилла *a* – 424,7–489,8 мг/100 г, хлорофилла *b* – 163,9–203,3 мг/100 г. При этом суммарное содержание желтых пигментов в сухом веществе данной продукции изменялось от 109,8 до 186,3 мг/100 г, в том числе β -каротина – от 39,9 до 67,7 мг/100 г, ксантофиллов – от 62,7 до 135,4 мг/100 г.

Таблица 3. Содержание хлорофиллов и каротиноидов (мг на 100 г сухой массы) в микрозелени гороха овощного при разной интенсивности светодиодного освещения

Интенсивность осв-я, мкм/м ² с	Хлорофиллы									
	<i>a</i>		<i>b</i>		<i>a+b</i>		<i>a/b</i>			
	$\bar{x} \pm s_x$	<i>t</i>	$\bar{x} \pm s_x$	<i>t</i>	$\bar{x} \pm s_x$	<i>t</i>	$\bar{x} \pm s_x$	<i>t</i>	$\bar{x} \pm s_x$	<i>t</i>
200 – Контроль	429,6±1,1		163,9±0,9		593,5±2,0		2,6±0,1			
50	479,4±0,5	42,7*	190,9±1,1	18,9*	670,3±1,5	30,4*	2,5±0,1	-7,5*		
100	489,8±0,6	49,1*	203,3±0,6	35,0*	693,1±1,2	42,4*	2,4±0,1	-22,0*		
150	480,8±0,4	44,5*	192,4±0,7	24,4*	673,2±1,1	34,7*	2,5±0,1	-11,1*		
250	424,7±1,1	-2,5	164,4±0,5	0,4	589,1±0,4	-2,1	2,6±0,2	-2,1		
Интенсивность освещения, мкм/м ² с	Каротиноиды								Хлорофиллы/Каротиноиды	
	сумма		β -каротин		ксантофиллы		β -каротин/ксантоф			
	$\bar{x} \pm s_x$	<i>t</i>	$\bar{x} \pm s_x$	<i>t</i>	$\bar{x} \pm s_x$	<i>t</i>	$\bar{x} \pm s_x$	<i>t</i>	$\bar{x} \pm s_x$	<i>t</i>
200 – Контроль	109,8±0,1		47,1±0,5		62,7±0,3		0,8±0,01		5,4±0,1	
50	126,9±3,5	4,8*	45,3±0,3	-3,3*	81,6±3,3	5,8*	0,6±0,02	-8,9*	5,3±0,2	-0,7
100	186,3±3,1	24,9*	67,7±0,5	30,0*	118,6±3,6	15,6*	0,6±0,02	-7,4*	3,7±0,1	-27,9*
150	181,0±3,0	23,5*	45,6±0,3	-2,8*	135,4±3,3	21,8*	0,3±0,01	-26,5*	3,7±0,1	-27,4*
250	162,5±3,8	13,8*	39,9±0,2	-13,4*	122,6±4,1	14,7*	0,3±0,01	-24,5*	3,6±0,1	-19,4*

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

Заметим, что в микрозелени гороха, в отличие от микрозелени капусты, максимальные показатели накопления и зеленых, и желтых фотосинтезирующих пигментов были достигнуты при интенсивности освещения не 50, а 100 мкм/м²сек, тогда как минимальные – не при 150, а при 200 и 250 мкм/м²сек в первом случае и 200 мкм/м²сек во втором. При этом, как и в микрозелени капусты,

интенсивность светодиодного освещения оказала определенное влияние на производные характеристики пигментного фонда пластид, что подтверждалось заметным варьированием в рамках эксперимента соотношений количеств хлорофиллов и каротиноидов, хлорофиллов *a* и *b*, а также β -каротина и ксантофиллов, соответствовавших областям значений 3,6–5,4; 2,4–2,6 и 0,3–0,8 (табл. 3). Анализ данных соотношений однозначно указывал на приоритетную роль хлорофилла *a* в пуле зеленых пластидных пигментов и ксантофиллов в таковом желтых.

Повариантное сравнение исследуемых характеристик пигментного фонда пластид микрозелени гороха овощного вывило существенные различия как в содержании, так и в соотношении его основных компонентов (табл. 4). При этом, в отличие от микрозелени капусты, почти во всех вариантах опыта с более низкой, чем в контроле, интенсивностью светодиодного освещения наблюдалась активизация накопления зеленых пигментов на 13–17 %, более выраженная у хлорофилла *b*, нежели у хлорофилла *a* (соответственно на 17–24 % и 12–14 %), что обусловило хотя и незначительное, но все же достоверное снижение на 4–8 % соотношения их количеств относительно контроля. Лишь в единичном случае – при наибольшей в эксперименте интенсивности освещения в 250 мкм/м²сек значимых различий с последним у исследуемых характеристик комплекса зеленых пигментов не выявлено.

Что касается каротиноидов, то позитивное влияние исследуемого фактора на их общее содержание в микрозелени гороха в большинстве вариантов опыта оказалось заметно сильнее, чем у хлорофиллов, о чем свидетельствовала более выраженная активизация их накопления по сравнению с контролем, составившая 16–70 % и наиболее значительная на фоне интенсивности освещения 100 и 150 мкм/м²сек и наименьшая при 50 мкм/м²сек (табл. 4). Вместе с тем почти во всех вариантах опыта этот эффект был обусловлен исключительно усилением накопления ксантофиллов на 30–116 %, и лишь в единичном случае – в варианте с интенсивностью освещения 100 мкм/м²сек имела место активизация биосинтеза не только ксантофиллов, но и β -каротина. Тем не менее соотношение количеств данных компонентов каротиноидного комплекса, уступавшее контролю на 25–63 %, указывало на превышение темпов накопления ксантофиллов над таковыми β -каротина во всех вариантах опыта.

Показанные выше особенности трансформации пигментного фонда микрозелени гороха под действием исследуемого фактора, в свою очередь, как и у микрозелени капусты, обусловили даже более выраженное, чем у нее, усиление роли желтых пигментов, что подтверждалось более значительным (на 32 %) отставанием от контроля соотношения количеств хлорофиллов и каротиноидов (табл. 4). На наш взгляд, это могло быть связано с особой защитной функцией последних, предохраняющих светочувствительные хлорофиллы от фотодинамических повреждений.

Таблица 4. Относительные различия с контролем вариантов опыта с разной интенсивностью светодиодного освещения по содержанию хлорофиллов и каротиноидов в сухом веществе микрозелени гороха овощного, %

Интенсивность освещения, мкм/м ² сек	Хлорофиллы				Каротиноиды				Хлорофиллы ÷ Каротиноиды	Совокупный эффект*)
	a	b	a+b	a:b	сумма	β -каротин	ксантофиллы	β -карот. ÷ ксантофиллы		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
50	+11,6	+16,5	+12,9	-3,8	+15,6	-3,8	+30,1	-25,0	-	+82,9
100	+14,0	+24,0	+16,8	-7,7	+69,7	+43,7	+89,2	-25,0	-31,5	+257,4
150	+11,9	+17,4	+13,4	-3,8	+64,8	-3,2	+115,9	-62,5	-31,5	+220,2
250	-	-	-	-	+48,0	-15,3	+95,5	-62,5	-33,3	+128,2

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.

Таким образом, выявленные межвариантные различия в составе пигментного комплекса пластид микрозелени гороха свидетельствовали о существенном влиянии на него исследуемого фактора. С целью выявления интенсивности светодиодного освещения, обеспечившей максимальную и минимальную степень изменения темпов биосинтеза фотосинтезирующих пигментов относительно контроля, для каждого варианта опыта были определены суммарные значения относительных размеров положительных и отрицательных различий с последним по общему количеству хлорофиллов и каротиноидов, а также содержанию основных форм данных пигментов. Возвращаясь к табл. 4, нетрудно убедиться, что, в отличие от капусты белокочанной, значения совокупности обозначенных признаков у микрозелени гороха характеризовались положительной направленностью во всех вариантах опыта. При этом наиболее высокими, на 257 и 220 % превышавшими контрольный уровень, они оказались не при минимальной, как в эксперименте с капустой, интенсивности освещения, а при ее значениях 150 и особенно 100 мкм/м²сек, что свидетельствовало о наибольшей насыщенности ее ассимиляционного аппарата фотосинтезирующими пигментами именно в этих вариантах опыта. В соответствии со снижением данного показателя, указывающим на обеднение пигментного фонда пластид микрозелени гороха, а следовательно, и ослабление фотосинтетической функции, было проведено распределение вариантов опыта с разной интенсивностью освещения, выраженной в мкм/м²сек, следующим образом:

100 > 150 > 250 > 50 > 200.

Как видим, в отличие от микрозелени капусты белокочанной, наиболее насыщенным фондом фотосинтезирующих пигментов в рамках эксперимента характеризовались образцы микрозелени гороха при интенсивности светодиодного освещения 150 и в большей степени 100 мкм/м²сек, тогда как наиболее обедненным – при 50 и особенно при 200 мкм/м²сек, выбранной в качестве контроля.

Заключение

В результате исследования влияния интенсивности светодиодного освещения (50, 100, 150, 200, 250 мкм/м²сек) на содержание в образцах микрозелени капусты белокочанной и гороха овощного фотосинтезирующих пигментов (хлорофиллов *a* и *b*, β -каротина и ксантофиллов установлено следующее.

Снижение интенсивности освещения до 150 мкм/м²сек относительно контроля (200 мкм/м²сек) приводило к наиболее выраженному в рамках эксперимента обеднению микрозелени капусты зелеными пластидными пигментами на 27 % по сравнению с контролем, тогда как ее снижение до 100 мкм/м²сек уже не оказывало значимого влияния на их общее содержание, а дальнейшее снижение до 50 мкм/м²сек способствовало обогащению ими микрозелени более чем на 16 %. Увеличение же интенсивности освещения до 250 мкм/м²сек обуславливало сходное с установленным при интенсивности 150 мкм/м²сек обеднение микрозелени хлорофиллами на 18 %. При этом в динамике накопления в ней каротиноидов выявлены закономерности, аналогичные установленным для хлорофиллов, и лишь при интенсивности освещения 50 и 100 мкм/м²сек отмечена активизация их накопления на 24 и 12 % и его ослабление на 14 и 8 % при интенсивности 150 и 250 мкм/м²сек. Несмотря на сходство профилирующих тенденций в накоплении хлорофиллов и каротиноидов, во всех случаях темпы биосинтеза хлорофиллов были ниже, а каротиноидов – выше, чем в контроле, при наибольшей активизации накопления β -каротина на фоне интенсивности освещения 50 и 100 мкм/м²сек.

В соответствии со снижением содержания пластидных пигментов хлоропластов в микрозелени капусты, указывающем на потенциальное ослабление фотосинтетической функции, варианты опыта с разной интенсивностью светодиодного освещения, выраженной в мкм/м²сек, были распределены следующим образом:

50 > 100 > 200 > 250 > 150.

Таким образом, наиболее насыщенным фондом фотосинтезирующих пигментов в рамках эксперимента характеризовались образцы микрозелени капусты при интенсивности светодиодного освещения 100 и особенно 50 мкм/м²сек, тогда как наиболее обедненным – при 250 и особенно при 150 мкм/м²сек.

В отличие от капусты белокочанной, в микрозелени гороха овощного наибольшее содержание и зеленых, и желтых пластидных пигментов установлено при интенсивности освещения не 50, а 100 мкм/м²сек, тогда как минимальное – не при 150, а при 200 и 250 мкм/м²сек в первом случае и 200 мкм/м²сек во втором. При этом воздействие исследуемого фактора способствовало преимущественному усилению накопления первых на 13–17 % и вторых (в основном за счет ксантофиллов) на 16–70 %.

В соответствии со снижением содержания пигментов хлоропластов в микрозелени гороха, указывающим на потенциальное ослабление фотосинтетической функции, варианты опыта с разной интенсивностью светодиодного освещения, выраженной в мкм/м²сек, были распределены следующим образом:

100 > 150 > 250 > 50 > 200.

Таким образом, в отличие от микрозелени капусты, наиболее насыщенным фондом фотосинтезирующих пигментов в рамках эксперимента характеризовались образцы микрозелени гороха при интенсивности светодиодного освещения 150 и в большей степени 100 мкм/м²сек, тогда как наиболее обедненным – при 50 и особенно при 200 мкм/м²сек, выбранной в качестве контроля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оптимизация светодиодной системы освещения витаминной космической оранжереи / О. И. Коновалова [и др.] // Авиакосмическая и экологическая медицина, 2016. – Т. 50, № 3. – С. 17–23.
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 учёных, Тюмень, 5 февраля 2014 г. / Государственный аграрный университет Северного Зауралья; редкол.: О. М. Шевелёва (гл. ред.) [и др.]. – Тюмень, 2014. – С. 8–12.
3. Годнев, Т. Н. Хлорофилл: его строение и образование в растении / Т. Н. Годнев. – Минск: Изд-во Акад. наук БССР, 1963. – 318 с.
4. 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.
5. 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.
6. Методы определения сухих веществ: ГОСТ 8756.2-82. – Введен 01.01.1983. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 5 с.