

УДК 634.737:581.5:581.522.4(476)

ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ НА БИОХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ МИКРОЗЕЛЕНИ ГОРОХА ОВОЩНОГО

А. М. ПАШКЕВИЧ¹⁾, А. И. ЧАЙКОВСКИЙ¹⁾, Ж. А. РУПАСОВА²⁾, Т. И. ВАСИЛЕВСКАЯ²⁾, Н. Б. КРИНИЦКАЯ²⁾

¹⁾Институт овощеводства Национальной академии наук Беларуси,
ул. Ковалёва, 2, 223013, а/г Самохваловичи, Минский район, Беларусь

²⁾Центральный ботанический сад Национальной академии наук Беларуси,
ул. Сурганова, 2в, 220012, Минск, Беларусь

Приведены результаты сравнительного исследования в производственном эксперименте влияния продолжительности светодиодного освещения (8, 10, 12, 14, 16 ч) на 13 характеристик биохимического состава микрозелени гороха овощного (сорт Павлуша) – содержание сухих, дубильных и пектиновых веществ, свободных органических, аскорбиновой и гидроксикоричных кислот, растворимых сахаров, общего протеина и альбуминов, основных групп биофлавоноидов и показатель сахарокислотного индекса. Содержание сухих веществ в исследуемых образцах варьировалось (в рамках эксперимента) в диапазоне 9,3–11,8 % при содержании в сухой массе свободных органических, аскорбиновой и гидроксикоричных кислот 4,35–8,46 %, 359,8–487,8 мг/100 г и 1465,1–1956,0 мг/100 г соответственно. Содержание растворимых сахаров было от 8,8 до 13,2 % при значительных межвариантных различиях показателя сахарокислотного индекса, изменявшегося в интервале 1,04–3,03. При этом параметры накопления пектиновых веществ составляли 3,88–4,54 %, при содержании дубильных веществ 1,23–1,92 %. Установлено практически полное отсутствие в микрозелени гороха антоциановых пигментов, тогда как содержание флавонолов варьировалось в диапазоне 1711,7–2189,2 мг/100 г, а катехинов – 376,7–483,0 мг/100 г. При этом было обнаружено весьма высокое содержание в ней протеинов и наиболее ценной легкоусвояемой их части – растворимых белков (альбуминов), варьировавшееся в рамках эксперимента в мг/г сухой массы в диапазонах 412,3–443,4 и 8,38–18,0.

Значительная ширина диапазонов варьирования биохимических характеристик микрозелени гороха свидетельствовала об их существенной зависимости от продолжительности светодиодного освещения, имевшей весьма неоднозначный характер. Так, наименее значительные изменения в биохимическом составе микрозелени гороха относительно контроля (12-часовая экспозиция) выявлены при 10- и 14-часовой продолжительности освещения, тогда как наибольшие – при 8- и особенно при 16-часовой. При этом наиболее высокий интегральный уровень питательной и витаминной ценности производимой продукции по совокупности биохимических характеристик установлен при 14-часовом освещении, тогда как минимальный – при 8-часовом.

Образец цитирования:

Пашкевич АМ, Чайковский АИ, Рупасова ЖА, Василевская ТИ, Криницкая НБ. Влияние продолжительности светодиодного освещения на биохимический состав микрозелени гороха овощного. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2022;1:37–45.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-1-37-45>

For citation:

Pashkevich HM, Tchaikovsky AI, Rupasova ZhA, Vasilevskaya TI, Krinitckaya NB. The influence of the duration of led lighting on the biochemical composition of the peas microgreens. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2022;1:37–45. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-1-37-45>

Авторы:

Анна Михайловна Пашкевич – аспирант; заведующий сектором бобовых овощных культур.
Андрей Иванович Чайковский – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; директор.
Жанна Александровна Рупасова – доктор биологических наук, профессор; член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси; заведующий лабораторией химии растений.
Тамара Ивановна Василевская – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории химии растений.
Наталья Болеславовна Криницкая – научный сотрудник лаборатории химии растений.

Authors:

Hanna M. Pashkevich, graduate student; head of the legume vegetable crops sector.
faba@belniio.by
Andrey I. Tchaikovsky, PhD (agriculture), docent; director.
director@belniio.by
Zhanna A. Rupasova, doctor of science (biology), full professor; corresponding member of the National Academy of Sciences of Belarus; head of the laboratory of plant chemistry.
j.rupasova@cbg.org.by
Tamara I. Vasilevskaya, PhD (biology); senior researcher at the laboratory of plant chemistry.
t.vasileuskaya@cbg.org.by
Natalya B. Krinitckaya, researcher at the laboratory of plant chemistry.
n.krinitckaya@cbg.org.by

Ключевые слова: продолжительность светодиодного освещения; горох овощной; микрозелень; биохимический состав; органические кислоты; углеводы; белки; биофлавоноиды; питательная и витаминная ценность продукции.

Благодарность. Исследования выполнены в рамках Государственной программы научных исследований «Сельскохозяйственные технологии и продовольственная безопасность», подпрограммы 6 «Земледелие и селекция», задания 2.7.3 «Исследование биометрических показателей, продуктивности и биохимического состава микрозелени при выращивании в условиях искусственного освещения на основе светодиодов».

THE INFLUENCE OF THE DURATION OF LED LIGHTING ON THE BIOCHEMICAL COMPOSITION OF THE PEAS MICROGREENS

H. M. PASHKEVICH^a, A. I. TCAIKOVSKY^a, Z. A. RUPASOVA^b, T. I. VASILEVSKAYA^b, N. B. KRINITCKAYA^b

*^aThe Institute of Vegetable Growing, National Academy of Sciences of Belarus,
2 Kavaleva Street, agro-town Samakhvalavichy, Minsk district 223013, Belarus*

*^bCentral Botanical Garden, National Academy of Sciences of Belarus,
2v Surganova Street, 220012 Minsk, Belarus*

Corresponding author: Zh. A. Rupasova (j.rupasova@cbg.org.by)

The results of a comparative study of the effect of the duration of LED lighting are presented (8, 10, 12, 14, 16 hour) on 13 characteristics of the biochemical composition of vegetable peas microgreens (Pavlusha variety) – the content of dry, tannic and pectin substances, free organic, ascorbic and hydroxycinnamic acids, soluble sugars, total protein and albumins, the main groups of bioflavonoids and the indicator of the sugar acid index.

The dry matter content in the studied samples was 9.3–11.8 %, the content of free organic, ascorbic and hydroxycinnamic acids in the dry mass was 4.35–8.46 %, 359.8–487.8 mg/100 g and 1465.1–1956.0 mg/100 g, respectively. The content of soluble sugars was from 8.8 to 13.2 % with significant variant differences in the indicator of the sugar acid index, which varied in the range of 1.04–3.03. At the same time, the parameters of the accumulation of pectin substances were 3.88–4.54 %, the content of tannins – 1.23–1.92 %. The almost complete absence of anthocyanin pigments in the pea microgreens was found, the content of flavonols varied in the range of 1711.7–2189.2 mg/100 g, and catechins – 376.7–483.0 mg/100 g. At the same time, a high content of proteins and their valuable part – soluble proteins (albumins), which varied in mg/g of dry weight in the ranges of 412.3–443.4 and 8.38–18.0, was found in the microgreens.

The considerable width of the ranges of variation of the biochemical characteristics of the micro-green peas testified to their significant dependence on the duration of LED lighting, which was ambiguous. The least significant changes in the biochemical composition of peas microgreens relative to the control (12 hours duration) were detected at 10 and 14 hours of illumination duration, while the greatest – at 8 and especially at 16 hours duration. At the same time, the highest integral level of nutritional and vitamin value of products according to the totality of biochemical characteristics is set at 14 hours of illumination, while the minimum is at 8 hours.

Keywords: duration of LED lighting; peas; micro-greens; biochemical composition; organic acids; carbohydrates; proteins; bioflavonoids; nutritional and vitamin value of products.

Acknowledgment. The research was carried out within the framework of the State Research Program «Agricultural Technologies and Food Security», subprogram 6 «Agriculture and breeding», task 2.7.3 «Study of biometric indicators, productivity and biochemical composition of microgreens when grown under artificial lighting conditions based on LEDs».

Введение

В последние годы в Беларуси наметилась тенденция к существенному увеличению спроса на продукцию микрозелени овощных культур, в том числе гороха овощного как источника широкого спектра полезных веществ. Вместе с этим значимым аспектом при выращивании микрозелени в условиях закрытой контролируемой среды является освещение, которое для высших растений одновременно является сигналом к росту и развитию и источником энергии [1]. Растения адаптируются к условиям световой среды не только изменениями морфофизиологических показателей, но и перестройкой своего светособирающего комплекса [2].

Наиболее важными параметрами режима освещения являются: фотопериод (продолжительность освещения), спектральный состав света, величина плотности потока фотонов и характер излучения. Особенно значительно влияет на растения продолжительность освещения, определяющая как рост биомассы, так и накопление вторичных метаболитов [3].

Использование искусственных светодиодных источников света в культуре микрозелени во всем мире ведется в направлении поиска оптимальных режимов освещения, обеспечивающих высокий биохимический состав и высокие продукционно-биометрические характеристики данного продукта [4–9].

Однако в зарубежной литературе встречается крайне ограниченное количество информации касательно продолжительности светодиодного освещения при выращивании микрозелени, а в отечественной литературе эти данные отсутствуют вовсе. По этой причине в 2020–2021 гг. были проведены эксперименты с использованием ряда режимов светодиодного освещения, важнейшим из которых являлась продолжительность его воздействия на опытные растения. При этом одной из задач исследований являлось установление оптимальной продолжительности фотопериода, обеспечивающей наиболее высокий уровень питательной и витаминной ценности микрозелени гороха по совокупности биохимических характеристик – содержанию сухих, пектиновых и дубильных веществ, свободных органических, аскорбиновой и гидроксикоричных кислот, растворимых сахаров, протеинов, альбуминов, катехинов, флавонолов и показателю сахарокислотного индекса.

Материалы и методы исследований

Исследования выполнены в рамках производственного эксперимента на образцах микрозелени гороха овощного (сорт Павлуша). Семена отбирались из существующей коллекции генетических ресурсов овощных культур РУП «Институт овощеводства». Предварительно была определена лабораторная всхожесть и энергия прорастания отобранных семян лабораторным методом для исключения фактора использования посевного материала с низкими кондиционными показателями. Установленная всхожесть находилась на уровне 98 %, энергия прорастания – на уровне 97 %. Посевной материал гороха овощного промывался и выдерживался в отстоянной воде (комнатной температуры + 22 °С, pH – 7,7, содержание хлора – не более 1,1 мг/л) в течение 12 часов. Перед посевом семена дезинфицировались 3%-ным раствором перекиси водорода и снова промывались; посев выполнялся сплошным методом из расчета 600 шт. семян на делянку. Полив проводился через сутки по 60 мл на делянку отстоянной водопроводной водой ранее указанных характеристик.

Культивирование микрозелени проводилось в полипластовых поддонах (179×132 мм, объемом 750 мл), стерилизуемых 96 % этиловым спиртом. В качестве грунта для выращивания использовался подготовленный торфяной субстрат, проавтоклавированный в паровом автоклаве ВК-75-01 (время стерилизационной выдержки – 20 мин, при температуре 132 ± 2 °С и давлении 0,1 МПа). Опыты закладывались в трехкратной повторности в три цикла выращивания. Расположение делянок – случайное (рэндомизированное), размер одной делянки составлял 237 см² (17,9×13,2 см), площадь под одним вариантом – 0,4 м².

Выращивание опытных растений осуществлялось в условиях светокультуры в фитотроне, оснащенный облучательной фитоустановкой стеллажного типа FLORA LED 300/2/4 разработки и производства Государственного научно-производственного унитарного предприятия «Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий Национальной академии наук Беларуси». Установка была оснащена десятью светодиодными светильниками ДСП08-3х12-004 УХЛ4 при продолжительности освещения 8, 10, 12, 14 и 16 часов. В качестве контроля было принято значение фотопериода, равное 12 час.

Основные технические характеристики используемого в опыте светильника сводились к следующим показателям: класс светораспределения – П, тип кривой силы света – Д, поток излучения – 16 Вт, поток фотонов – 80 мкмоль/с, фотосинтетический поток фотонов 75 мкмоль/с, КПД светильника – 43 %, эффективность потока фотонов 2,1 мкмоль/с. Спектр излучения светодиодных светильников ДСП08-3х12-004 УХЛ4 находился в диапазоне длин волн от 380 до 780 нм, включая фотосинтетически активную радиацию. Наличие в излучении квантов света различных длин волн обеспечивало ход всего многообразия фотобиологических процессов, присущих растительным организмам. В качестве источника света в светильнике были применены высокоэффективные энергосберегающие светодиоды компании «NICHIA Corporation» (Япония) в сочетании со специальной технологией получения оптимального спектра на основе люминофорных композиций разработки НПУП «Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий Национальной академии наук Беларуси».

Исследование биохимического состава образцов микрозелени гороха овощного осуществляли по широкому спектру показателей, относящихся к разным классам действующих веществ. В свежих усредненных пробах растительного материала определяли содержание сухих веществ – по ГОСТ 28561-90¹; аскорбиновой кислоты (витамина С) – стандартным индофенольным методом; титруемых кислот (общей кислотности) – объемным методом [10].

В высушенных при температуре 60 °С пробах растительного материала определяли содержание: гидроксикоричных кислот (в пересчете на хлорогеновую) – спектрофотометрическим методом [11]; растворимых сахаров – ускоренным полумикрометодом [4]; пектиновых веществ – кальциево-пектатным методом [10]; суммы антоциановых пигментов – по методу T. Swain, W. E. Hillis [13], с построением градуировочной кривой по кристаллическому цианидину, полученному из плодов аронии черноплодной и очищенному по методике Ю. Г. Скориковой и Э. А. Шафтан [14]; собственно антоцианов и суммы катехинов (с использованием ванилинового реактива) – фотоэлектроколориметрическим методом [10; 15];

¹ГОСТ 32195-2013. Корма, комбикорма. Метод определения содержания аминокислот. Введ. 01.07.2015. Москва: Стандартинформ, 2014.

суммы флавонолов (в пересчете на рутин) – спектрофотометрическим методом [10]; дубильных веществ (танинов) – титрометрическим методом Левентала [16]. Общее содержание протеинов определяли методами формольного и потенциометрического титрования с введением поправочных коэффициентов [17] и предварительным проведением гидролиза белков в соответствии с протоколами пробоподготовки образцов для аминокислотного анализа[□]. Определение содержания альбуминов (растворимых белков) осуществляли по методу [18]. Выделение их из 3 г сырого растительного материала, предварительно растертого в жидком азоте, проводили с использованием в качестве экстрагента 15 мл 0,1 М NaCl при температуре + 4 °С в течение 2 ч при постоянном помешивании. Калибровочную кривую для количественного определения растворимых белков в исследуемых образцах строили по БСА (бычьему сывороточному альбумину) в концентрации от 10 до 500 мкг/мл. 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*. Выявление самого эффективного варианта опыта, обеспечившего наиболее высокий интегральный уровень питательной и витаминной ценности микрозелени гороха овощного, осуществляли с использованием авторского способа ранжирования объектов по совокупности анализируемых признаков, защищенного патентом [21].

Результаты исследований и их обсуждение

Повариантное исследование биохимического состава микрозелени гороха овощного показало существенную зависимость его количественных характеристик от продолжительности светодиодного освещения. По нашим данным, содержание сухих веществ в исследуемых образцах варьировалось в рамках эксперимента в диапазоне 9,3–11,8 % при содержании в сухой массе свободных органических, аскорбиновой и гидроксикоричных кислот 4,35–8,46 %, 359,8–487,8 мг/100 г и 1465,1–1956,0 мг/100 г соответственно, растворимых сахаров – от 8,8 до 13,2 % при значительных межвариантных различиях показателя сахарокислотного индекса, изменявшегося в интервале 1,04–3,03. При этом параметры накопления пектиновых веществ составляли 3,88–4,54 %, при содержании дубильных веществ – 1,23–1,92 %. Установлено практически полное отсутствие в микрозелени гороха антоциановых пигментов, тогда как содержание флавонолов варьировалось в диапазоне 1711,7–2189,2 мг/100 г, а катехинов – 376,7–483,0 мг/100 г. При этом было обнаружено весьма высокое содержание в ней протеинов и наиболее ценной легкоусвояемой их части – растворимых белков (альбуминов), варьировавшееся в рамках эксперимента в мг/г сухой массы в диапазонах 412,3–443,4 и 8,38–18,0.

Значительная ширина диапазонов варьирования биохимических характеристик микрозелени гороха свидетельствовала об их существенной зависимости от продолжительности светодиодного освещения, имевшей весьма неоднозначный характер. Как следует из табл. 1, при 8-часовом воздействии на растения исследуемого фактора было показано отставание на 8 % от контроля содержания сухих веществ, тогда как при 10-часовом – нивелирование различий с ним в этом плане, а при более продолжительном воздействии – активизация их накопления на 6–17 %. При этом 8-часовая экспозиция стимулировала биосинтез свободных органических кислот, что подтверждалось превышением контрольного уровня их накопления на 35 %, тогда как 14- и 16-часовая приводили к обеднению микрозелени данными соединениями на 13–30 % при отсутствии достоверных различий с контролем при 10-часовом освещении. В большинстве вариантов опыта выявлено снижение на 11–26 % содержания в ней аскорбиновой кислоты, и лишь при 14-часовом освещении было показано отсутствие достоверных различий с контролем по данному признаку. Что касается гидроксикоричных кислот, то активизация их биосинтеза на 4–12 % по сравнению с контролем обнаружена лишь при 10- и 14-часовой экспозициях при отставании от него на 16 % по этому показателю при 8-часовой продолжительности освещения.

Вместе с тем незначительное обеднение микрозелени гороха растворимыми сахарами, не превышавшее 5–6 %, наблюдалось лишь при 8-часовой продолжительности освещения, тогда как по мере увеличения последней имела место прогрессирующая активизация их накопления на 11–41 %, максимальная при 16-часовой экспозиции (см. табл. 1). Это объясняет заметное снижение сахарокислотного индекса микрозелени гороха относительно контроля только при 8-часовом освещении (на 30 %) и весьма значительное, достигавшее 44–103 %, его увеличение при 14- и 16-часовом. Заметим, что наименее выраженное стимулирующее действие исследуемого фактора на биосинтез растворимых сахаров и увеличение показателя сахарокислотного индекса установлено на фоне 10-часовой экспозиции.

Наряду с этим при 8-часовой продолжительности освещения в микрозелени гороха выявлено ослабление на 9 % накопления пектиновых веществ по сравнению с контролем и нивелирование различий с ним по данному показателю при 10-часовой (см. табл. 1). При этом увеличение времени воздействия исследуемого фактора до 14 ч не оказало значимого влияния на содержание этих соединений, и лишь при 16-часовой экспозиции отмечено незначительное увеличение их содержания. Что касается дубильных веществ, то для них

было показано преимущественное снижение содержания относительно контроля, наиболее значительное при 8- и особенно 10-часовой продолжительности освещения, достигавшее соответственно 26 и 36 %, и лишь при 14-часовой экспозиции не обнаружено статистически значимых различий с контролем по данному признаку.

Заметим, что в составе Р-витаминного комплекса микрорзелени гороха не обнаружено присутствия антоциановых пигментов, в связи с чем ключевая роль в формировании его ответа на продолжительность светодиодного освещения принадлежала флавонолам и катехинам. Как следует из табл. 1, на фоне 8-часовой экспозиции наблюдалось снижение на 15 % общего содержания биофлавоноидов относительно контроля. Увеличение же продолжительности освещения способствовало незначительному (в пределах 7 %) усилению их накопления только при 10- и 14-часовом освещении, тогда как при 16-часовом имело место снижение данного показателя на 11 % относительно контроля. Аналогичный характер динамики в зависимости от продолжительности освещения наблюдался и у флавонолов, как у доминирующей группы этих соединений, поскольку их содержание в 3,8–5 раз превышало таковое катехинов. При этом на фоне 10- и особенно 8-часовой экспозиций наблюдалось снижение содержания последних соответственно на 8 и 20 % относительно контроля, тогда как при более длительном воздействии исследуемого фактора на опытные растения установлено нивелирование различий с ним по данному признаку.

Тем не менее продолжительность светодиодного освещения не оказала существенного влияния на общее количество белков в микрорзелени гороха, что подтверждалось невысокой вариабельностью его содержания в рамках эксперимента, обусловившей маловыразительные, хотя и достоверные, различия тестируемых вариантов опыта с контролем по данному признаку, не превышавшие 2–4 % (см. табл. 1). При этом только минимальная 8-часовая продолжительность светодиодного освещения незначительно (не более чем на 3 %) ингибировала его накопление, тогда как при увеличении времени воздействия данного фактора наблюдалось усиление накопления общего белка на 2–4 % относительно контроля, наибольшее при 10-часовой экспозиции.

Однако продолжительность светодиодного освещения оказала весьма заметное влияние на накопление в микрорзелени гороха альбуминов, для которых обнаружен весьма ощутимый ингибирующий эффект, в наибольшей степени проявившийся на фоне 8-часовой и особенно 16-часовой экспозиций, что подтверждалось снижением их содержания по сравнению с контролем соответственно на 13 и 47 % (см. табл. 1). Что касается 10- и 14-часовой продолжительности светодиодного освещения, то в первом случае наблюдалась активизация накопления альбуминов на 14 %, тогда как во втором – отсутствие изменений относительно контроля.

Можно убедиться, что уменьшение продолжительности светодиодного освещения до 8 ч способствовало обогащению микрорзелени гороха по сравнению с контролем на 35 % только свободными органическими кислотами, сопровождавшемуся ее обеднением на 3–54 % сухими, пектиновыми и дубильными веществами, аскорбиновой и гидроксикоричными кислотами, катехинами и флавонолами, общим протеином и альбуминами, а также растворимыми сахарами со снижением показателя сахарокислотного индекса на 30 %, тогда как сокращение времени освещения по сравнению с контролем до 10 ч усиливало накопление в ней на 4–88 % гидроксикоричных кислот, общего белка, альбуминов, флавонолов и растворимых сахаров при увеличении сахарокислотного индекса на 12 %, но при этом обуславливало снижение на 3–36 % содержания аскорбиновой кислоты, катехинов и дубильных веществ. Увеличение же продолжительности светодиодного освещения до 14 ч приводило к усилению накопления в микрорзелени гороха относительно контроля на 2–27 % сухих веществ, гидроксикоричных кислот, общего белка, флавонолов и растворимых сахаров при увеличении показателя сахарокислотного индекса на 44 %, сопровождавшемуся ингибированием на 13–19 % биосинтеза только свободных органических кислот. При этом 16-часовая экспозиция способствовала обогащению микрорзелени гороха на 3–41 % сухими и пектиновыми веществами, общим протеином и растворимыми сахарами при увеличении показателя сахарокислотного индекса на 103 % на фоне ее обеднения на 8–47 % аскорбиновой и свободными органическими кислотами, альбуминами, флавонолами и дубильными веществами.

На основании сравнения биохимических характеристик микрорзелени гороха в рамках эксперимента была выявлена продолжительность светодиодного освещения, обусловившая наибольшие и соответственно наименьшие параметры накопления в ней исследуемых соединений разной химической природы (табл. 2). Отметим, что 8-часовая его продолжительность обеспечивала максимальное в эксперименте накопление титруемых кислот, 10-часовая – общего протеина, альбуминов, а также Р-витаминов за счет наиболее активного биосинтеза флавонолов, тогда как 12-часовая, принятая в качестве контроля, – аскорбиновой кислоты, катехинов и дубильных веществ. Применение 14-часовой продолжительности освещения способствовало наибольшему в эксперименте накоплению в микрорзелени гороха гидроксикоричных кислот и сходному с контролем накоплению аскорбиновой кислоты и дубильных веществ, а также сходному с контролем и 16-часовой экспозицией накоплению катехинов при сопоставимом для 10-часовой экспозиции наиболее высоком общем содержании биофлавоноидов, тогда как использование 16-часовой продолжительности освещения обеспечивало максимальное в эксперименте содержание сухих и пектиновых

веществ, катехинов и растворимых сахаров при наиболее высоком показателе сахарокислотного индекса, свидетельствующем о наибольшей сладости производимой продукции.

Таблица 1

Относительные различия с контролем вариантов опыта с разной продолжительностью светодиодного освещения по содержанию действующих веществ в сухом веществе микрозелени гороха овощного, %

Table 1

Relative differences with the control of the experiment variants with different duration of LED lighting on the content of active substances in the dry matter of micro-green peas, %

Показатель	8 ч	10 ч	14 ч	16 ч
Сухие вещества	–7,9	–	+5,9	+16,8
Свободные органические кислоты	+35,4	–	–12,8	–30,4
Аскорбиновая кислота	–10,7	–26,2	–	–23,7
Гидроксикоричные кислоты	–16,1	+4,4	+12,1	–
Растворимые сахара	–5,4	+10,7	+25,1	+41,2
Сахарокислотный индекс	–30,2	+12,1	+43,6	+103,4
Пектиновые вещества	–9,3	–	–	+6,1
Общий белок	–3,2	+4,1	+1,7	+3,1
Альбумины	–12,7	+14,3	–	–46,8
Катехины	–20,5	–8,3	–	–
Флавонолы	–13,5	+10,6	+7,6	–12,4
Сумма биофлавоноидов	–14,9	+6,9	+6,6	–10,8
Дубильные вещества	–25,5	–35,9	–	–7,8

Примечание. Прочерк означает отсутствие статистически значимых по *t*-критерию Стьюдента различий с контролем при $p < 0,05$.

Наряду с этим были выявлены варианты опыта с минимальными значениями биохимических характеристик микрозелени гороха, характеризовавшиеся наибольшим их отставанием от контроля (см. табл. 1). Так, при 8-часовой продолжительности освещения установлены наименьшие в эксперименте значения большинства биохимических характеристик, тогда как при 10-часовой – только аскорбиновой кислоты и дубильных веществ, при 16-часовой – альбуминов, аскорбиновой и свободных органических кислот.

Таблица 2

Продолжительность светодиодного освещения, обуславливающая наибольшее (max) и наименьшее (min) содержание органических соединений в сухом веществе микрозелени гороха овощного

Table 2

The duration of LED lighting, which determines the highest (max) and lowest (min) content of organic compounds in the dry matter of vegetable pea microgreens

Показатель	8 ч	10 ч	12 ч	14 ч	16 ч
Сухие вещества	min				max
Свободные органические кислоты	max				min
Аскорбиновая кислота		min	max	max	min
Гидроксикоричные кислоты	min			max	
Растворимые сахара	min				max
Сахарокислотный индекс	min				max
Пектиновые вещества	min				max
Общий белок	min	max			
Альбумины		max			min
Катехины	min		max	max	max
Флавонолы	min	max			
Сумма биофлавоноидов	min	max		max	
Дубильные вещества		min	max	max	

Таким образом, что продолжительность светодиодного освещения оказывала существенное, причем неоднозначное влияние на темпы биосинтеза органических соединений в микрозелени гороха. С целью выявления продолжительности светодиодного освещения, обеспечившей наиболее высокий интегральный уровень питательной и витаминной ценности производимой продукции в соответствии с выбранным методическим подходом [19], для каждого тестируемого варианта опыта было осуществлено суммирование относительных размеров положительных и отрицательных расхождений с контролем по 13 количественным характеристикам биохимического состава образцов микрозелени гороха (табл. 3).

Таблица 3

Относительные размеры, амплитуды и соотношения разноориентированных различий с контролем вариантов опыта с разной продолжительностью светодиодного освещения по биохимическим характеристикам микрозелени гороха овощного

Table 3

Relative sizes, amplitudes and ratios of differences with the control of experimental variants with different duration of LED lighting according to the biochemical characteristics of vegetable pea microgreens

Продолжительность освещения	Относительные различия, %				
	положительное	отрицательное	амплитуда	положительное / отрицательное	совокупный эффект
8 ч	35,4	169,9	205,3	0,2	-134,5
10 ч	63,1	70,4	133,5	0,9	-7,3
14 ч	102,6	12,8	115,4	8,0	+89,8
16 ч	170,6	131,9	302,5	1,3	+38,7

Как видим, амплитуда выявленных отклонений тестируемых вариантов опыта от контроля по совокупности исследуемых признаков варьировалась в рамках эксперимента от 115,4 и 133,5 % при 14- и 10-часовом освещении до 302,5 % при 16-часовом, что свидетельствовало о разной степени влияния исследуемого фактора на качественный состав микрозелени гороха – наименьшей в двух первых случаях и наибольшей – в последнем. Весьма значительным, уступавшим установленному при 16-часовой экспозиции в 1,5 раза, оказалось влияние на ее биохимический состав также 8-часовой продолжительности освещения, оказавшей преимущественно негативное воздействие на интегральный уровень питательной и витаминной ценности микрозелени гороха. Об этом свидетельствовало почти 5-кратное превышение суммарных размеров отрицательных сдвигов в ее биохимическом составе над таковыми положительных, что указывало на существенное ухудшение качества продукции по сравнению с контролем, подтверждаемое также отрицательной величиной совокупного эффекта (см. табл. 3). При этом на фоне 10-часовой экспозиции все еще сохранялось, хотя и менее выраженное, чем при 8-часовой, но все же достоверное превышение в 1,1 раза размеров отрицательных отклонений от контроля над положительными, что указывало на некоторое ухудшение ее качественного состава по сравнению с 12-часовой экспозицией, подтверждаемое также незначительной отрицательной величиной совокупного эффекта.

Вместе с тем увеличение продолжительности светодиодного освещения до 14 и 16 ч оказывало весьма выразительное позитивное влияние на биохимический состав микрозелени гороха. Это подтверждалось в 8,0 и 1,3 раза более высоким, чем в контроле, интегральным уровнем питательной и витаминной ценности данной продукции, оцениваемым кратным размером превышения относительных размеров положительных сдвигов над таковыми отрицательных, а также положительными значениями совокупного эффекта. При этом наиболее успешным в этом плане следовало признать 14-часовую продолжительность освещения.

В соответствии со снижением кратного размера соотношения положительных и отрицательных сдвигов в биохимическом составе микрозелени гороха относительно контроля при разной продолжительности воздействия исследуемого фактора на опытные растения, тестируемые варианты опыта располагались следующим образом:

$$14 \text{ ч} > 16 \text{ ч} > 12 \text{ ч} > 10 \text{ ч} > 8 \text{ ч}.$$

Таким образом, лидирующее положение в эксперименте по интегральному уровню питательной и витаминной ценности микрозелени гороха, превосходившему таковой при 12-часовой продолжительности освещения в 8 раз, принадлежало варианту опыта с 14-часовым освещением. При этом вариант с 16-часовым освещением, превосходивший контрольный в 1,3 раза, уступал в этом плане лидирующему варианту опыта в 6,2 раза. Что касается вариантов опыта с 8- и 10-часовой продолжительностью освещения, то суммарная величина отрицательных отклонений биохимических характеристик от контроля в них почти в 4 и 1,1 раза превышала таковую положительных, что обусловило их отставание от более успешных вариантов опыта с 14- и 16 часовым освещением по интегральному уровню питательной и витаминной

ценности продукции в 40 и 6 соответственно, а также в 9 и 1,5 раза, что позволило считать их в этом плане неэффективными.

Заключение

На основании сравнительного исследования в производственном эксперименте влияния продолжительности светодиодного освещения (8, 10, 12, 14, 16 ч) на 13 характеристик биохимического состава микрозелени гороха овощного (сорт Павлуша) – содержание сухих, дубильных и пектиновых веществ, свободных органических, аскорбиновой и гидроксикоричных кислот, растворимых сахаров, общего протеина и альбуминов, основных групп биофлавоноидов и показатель сахарокислотного индекса установлено следующее. Наименее значительные изменения в биохимическом составе микрозелени гороха относительно контроля (12-часовая экспозиция) выявлены при 10- и 14-часовой продолжительности освещения, тогда как наибольшие – при 8- и особенно при 16-часовой. При этом лидирующее положение по интегральному уровню питательной и витаминной ценности производимой продукции, превосходившему таковой в контроле в 8,3 раза, принадлежало варианту опыта с 14-часовым освещением при отставании от него варианта с 16-часовым освещением в 5,2 раза. При этом для вариантов с 8- и 10-часовой продолжительностью освещения показано отставание в этом плане от варианта с 14- часовым освещением соответственно в 42 и 12 раз, тогда как от варианта с 16-часовым освещением – в 8 и 2 раза, что позволило считать их неэффективными в обеспечении высокого качества микрозелени гороха.

Библиографические ссылки

1. Meng Q, Kelly N, Runkle ES. Substituting green or far-red radiation for blue radiation induces shade avoidance and promotes growth in lettuce and kale. *Environmental and Experimental Botany*. 2019;162:383–391. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2019.03.016.
2. Анисимов АА. Влияние узкополосного красно-синего освещения на пигментный комплекс некоторых декоративных растений. В: *Перспективы развития АПК в работах молодых ученых: материалы региональной научно-практической конференции молодых ученых, Тюмень, 5 февраля 2014 г.* Тюмень: [б. и.]; 2014. с. 8–12.
3. Коновалова ИО, Беркович ЮА, Ерохин АН, и др. Оптимизация светодиодной системы освещения витаминной космической оранжереи. *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2016;50(3):17–23.
4. Zhang X, Bian Z, Yuan X, Chen X. A review on the effects of light-emitting diode (LED) light on the nutrients of sprouts and microgreens. *Trends in Food Science & Technology*. 2020;99:1–15. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.02.031.
5. Andrei Z, Vasilache V, Pintilie O, Stoleru T. Blue and Red LED Illumination Improves Growth and Bioactive Compounds Contents in *Acyanic* and *Cyanic Ocimum basilicum* L. microgreens. *Molecules*. 2017;22(2111):1–14. DOI: 10.3390/molecules22122111.
6. Brazaitytė A, Vaštakaitė-Kairienė V, Viršilė A. Changes in mineral element content of microgreens cultivated under different lighting conditions in a greenhouse. *Acta Horticulturae*. 2018;1227:507–516. DOI: 10.17660/ActaHortic.2018.1227.64.
7. Brazaitytė A, et al. Comparison of LED and HPS illumination effects on cultivation of red pak choy microgreens under indoors and greenhouse conditions. *Acta Horticulturae*. 2020;1287:395–402.
8. Kong Y, Zheng 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*. 2020;178(104189):1–11. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2020.104189.
9. Craver JK, Gervac J, Lopez R, Kopsell DA. Light Intensity and Light quality from Sole-source Light-emitting Diodes Impact Phytochemical Concentrations within Brassica Microgreens. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 2017;142(1):3–12. DOI: 10.21273/JASHS03830-16.
10. Ермаков АИ, редактор. *Методы биохимического исследования растений*. Ленинград: [б. и.]; 1987.
11. Марсов НГ. *Фитохимическое изучение и биологическая активность брусники, клюквы и черники* [автореферат диссертации]. Пермь: [б. и.]; 2006. с. 99–101.
12. Кусакина МГ, Суворов ВИ, Чудинова ЛА. *Большой практикум «Биохимия». Лабораторные работы*. Пермь: [б. и.]; 2012.
13. Swain T, Hillis W. The phenolic constituents of *Prunus* *Domenstica*. 1. The quantitative analysis of phenolic constituents. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 1959;10(1):63–68. DOI: 10.1002/JSFA.2740100110.
14. Скорикова ЮГ, Шафтан ЭА. Методика определения антоцианов в плодах и ягодах. В: *Труды 3 Всесоюзного семинара по биологически активным (лечебным) веществам плодов и ягод*. Свердловск: [б. и.]; 1968. с. 451–461.
15. Андреева ВЮ и др. Методика определения антоцианов в плодах аронии черноплодной. *Фармация*. 2013;3:19–21.
16. Определение содержания дубильных веществ в лекарственном растительном сырье. В: *Государственная фармакопея СССР*. Москва: Медицина; 1987. Выпуск 1. с. 286–287.
17. Петров КП. *Метод формального титрования со смешанными индикаторами*. Киев: Вища школа; 1978. с. 16–18.
18. Bradford MM. Rapid and sensitive method for quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein dye binding. *Analytical Biochemistry*. 1976;8:248–254.
19. Рупасова ЖА, Решетников ВН, Яковлев АП. Патент ВУ 17648. *Способ ранжирования таксонов растения*. Опубл. 08.07.2013.

References

1. Meng Q, Kelly N, Runkle ES. Substituting green or far-red radiation for blue radiation induces shade avoidance and promotes growth in lettuce and kale. *Environmental and Experimental Botany*. 2019;162:383–391. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2019.03.016.
2. Anisimov AA. *Vliyaniye uzkopolosnogo krasno-sinego osveshcheniya na pigmentnyy kompleks nekotorykh dekorativnykh rasteniy* [The effect of narrow-band red-blue illumination on the pigment complex of some ornamental plants]. In: *Perspektivy razvitiya APK*

- v *rabotach molodykh ychenykh. Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferencii molodykh ychenykh, Tyumen, 5 fevrala, 2014 g.* [Prospects for the development of the agro-industrial complex in the works of young scientists: materials of the regional scientific and practical conference of young scientists, Tyumen, 2014 February 5]. Tyumen: [publisher unknown]; 2014. p. 8–12. Russian.
3. Konovalova IO, Berkovich YA, Erochin AN, et al. Optimization of the LED lighting system of the vitamin space greenhouse. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya medicina* [Aerospace and environmental medicine]. 2016;50(3):17–23. Russian.
4. Zhang X, Bian Z, Yuan X, Chen X. A review on the effects of light-emitting diode (LED) light on the nutrients of sprouts and microgreens. *Trends in Food Science & Technology*. 2020;99:1–15. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.02.031.
5. Andrei Z, Vasilache V, Pintilie O, Stoleru T. Blue and Red LED Illumination Improves Growth and Bioactive Compounds Contents in *Acyanic* and *Cyanic Ocimum basilicum* L. microgreens. *Molecules*. 2017;22(2111):1–14. DOI: 10.3390/molecules22122111.
6. Brazaitytė A, Vaštakaitė-Kairienė V, Viršilė A. Changes in mineral element content of microgreens cultivated under different lighting conditions in a greenhouse. *Acta Horticulturae*. 2018;1227:507–516. DOI: 10.17660/ActaHortic.2018.1227.64.
7. Brazaitytė A, et al. Comparison of LED and HPS illumination effects on cultivation of red pak choi microgreens under indoors and greenhouse conditions. *Acta Horticulturae*. 2020;1287:395–402.
8. Kong Y, Zheng 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*. 2020;178(104189):1–11. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2020.104189.
9. Craver JK, Gerovac J, Lopez R, Kopsell DA. Light Intensity and Light quality from Sole-source Light-emitting Diodes Impact Phytochemical Concentrations within Brassica Microgreens. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 2017;142(1):3–12. DOI: 10.21273/JASHS03830-16.
10. Ermakov AI. *Metody biokhimicheskogo issledovaniya rasteniy* [Methods of biochemical research of plants]. Leningrad: [publisher unknown]; 1987. Russian.
11. Marsov NG. *Fitokhimicheskoye izucheniye i biologicheskaya aktivnost' brusniki, klyukvy i cherniki* [Phytochemical study and biological activity of cranberries, cranberries and blueberries]. [PhD thesis]. Perm: [publisher unknown]; 2006. p. 99–101. Russian.
12. Kusankina MG, Suvorov VI, Chudinova LA. *Bolshoy praktikum «Biokhimiya»*. *Laboratornyye raboty* [Big workshop «Biochemistry». Laboratory work]. Perm: [publisher unknown]; 2012. Russian.
13. Swain T, Hillis W. The phenolic constituents of *Prunus* *Domenstica*. 1. The quantitative analysis of phenolic constituents. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 1959;10(1):63–68. DOI: 10.1002/JSFA.2740100110.
14. Skorikova YG, Chaftan EA. *Metodika opredeleniya antotsianov v plodakh i yagodakh* [Method of determination of anthocyanins in fruits and berries]. In: *Proceedings of the III All-Union seminar on biologically active (therapeutic) substances of fruits and berries*. Sverdlovsk: [publisher unknown]; 1968. p. 451–461. Russian.
15. Andreeva VY. The method of determining anthocyanins in the fruits of *aronia prunus*. *Pharmacy*. 2013;3:19–21. Russian.
16. *Opredeleniye soderzhaniya dubilnykh veshchestv v lekarstvennom rastitel'nom syr'ye* [Determination of the content of tannins in medicinal plant raw materials]. In: *State Pharmacopoeia of the USSR*. Moscow: Medicina; 1987. Volume 1. p. 286–287. Russian.
17. Petrov KP. *Metod formol'nogo titrovaniya so smeshannymi indikatorami* [The method of formal titration with mixed indicators]. Kiev: Vischa shkola; 1978. p. 16–18. Russian.
18. Bradford MM. Rapid and sensitive method for quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein dye binding. *Analytical Biochemistry*. 1976;8:248–254.
19. Rupasova GA, Rechetnikov VN, Yakovlev AP. *Sposob ranzhirovaniya taksonov rasteniya* [Patent BY 17648. Method of ranking plant taxa. Published 2013 July 8]. Russian.