

## Оригинальные статьи / Original articles

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2021-4-65-70>  
УДК 635.64:581.1.043

Т.Э. Кулешова<sup>1</sup>, О.Р. Удалова<sup>1</sup>,  
И.Т. Балашова<sup>2</sup>, Л.М. Аникина<sup>1</sup>,  
П.Ю. Конончук<sup>1</sup>, Г.В. Мирская<sup>1</sup>,  
Г.Г. Панова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Агрофизический научно-исследовательский институт» (ФГБНУ АФИ) 195220, Россия, г. Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр овощеводства» (ФГБНУ ФНЦО) 143072, Московская обл., Одинцовский городской округ, п. ВНИИССОК, ул. Селекционная, д. 14

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов:** Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи.

**Для цитирования:** Кулешова Т.Э., Удалова О.Р., Балашова И.Т., Аникина Л.М., Конончук П.Ю., Мирская Г.В., Панова Г.Г. Влияние различных источников света на продукционный процесс томата в интенсивной светокультуре. *Овощи России*. 2021;(4):65-70. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2021-4-65-70>

**Поступила в редакцию:** 26.05.2021

**Принята к печати:** 08.06.2021

**Опубликована:** 25.08.2021

Tatiana E. Kuleshova<sup>1</sup>, Olga R. Udalova<sup>1</sup>,  
Irina T. Balashova<sup>2</sup>, Lyudmila M. Anikina<sup>1</sup>,  
Pavel Yu. Kononchuk<sup>1</sup>, Galina V. Mirskaya<sup>1</sup>,  
Gayane G. Panova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Agrophysical Research Institute (ARI) 14, Grazhdanskiy pr., St.-Petersburg, 195220, Russia

<sup>2</sup> Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Vegetable Center" (FSBSI FSVC) 14, Selektsionnaya str., VNISSOK, Odintsovo district, Moscow region, Russia, 143072

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Authors' Contribution:** All authors contributed equally to the writing of the article.

**For citations:** Kuleshova T.E., Udalova O.R., Balashova I.T., Anikina L.M., Kononchuk P. Yu., Mirskaya G.V., Panova G.G. Influence of different light sources on the production process of tomato in intensive photoculture. *Vegetable crops of Russia*. 2021;(4):65-70. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2021-4-65-70>

**Received:** 26.05.2021

**Accepted for publication:** 08.06.2021

**Accepted:** 25.08.2021

# Влияние различных источников света на продукционный процесс томата в интенсивной светокультуре



## Резюме

**Введение.** Развитие представлений о влиянии световой среды – спектра излучения, интенсивности и продолжительности воздействия, на физиологию растений, служит основой для создания эффективных источников света для защищенного грунта.

**Цель.** Сравнительное испытание влияния световой среды с различным спектральным составом на продуктивность и качество томатов в условиях интенсивной светокультуры.

**Методы.** Исследования проводили в регулируемых условиях интенсивной светокультуры при выращивании томата карликового сорта Наташа селекции ФГБНУ «Федеральный центр овощеводства» на тонкослойных аналогах почвы (ТАП) с подачей питательного раствора к корням растений по щелевому капилляру в вегетационных светоустановках, разработанных в ФГБНУ АФИ. Источниками света служили натриевые лампы высокого давления и светодиодные светильники СД1, СД2 и СД3с различными спектрами излучения.

**Результаты.** Растения томата сорта Наташа, освещаемый в процессе развития лампами ДНаЗ, сформировали практически одинаковую урожайность со средней массой плодов 42,5 кг/м<sup>2</sup> с одного яруса в год. Выращенные под светодиодными светильниками растения томата сорта Наташа показали тенденцию к более низкой продуктивности на 29% под СД1 и на 8% – под СД2 и более высокой – на 19% под СД3 по сравнению с таковой под лампами ДНаЗ. Сравнительная оценка биохимического состава плодов томата свидетельствует о высоком их качестве под всеми тестируемыми источниками света.

**Заключение.** Культивирование растений карликовых сортов томата на ТАП показало наилучшие результаты по продуктивности при хорошем качестве растительной продукции под светодиодными светильниками СД3 со спектром излучения, близким к солнечному свету.

**Ключевые слова:** спектр излучения, светодиодные светильники, ДНаЗ, сорт Наташа, продуктивность, качество, рост

# Influence of different light sources on the production process of tomato in intensive photoculture

## Abstract

**Introduction.** The development of ideas about the influence of the light environment - the radiation spectrum, intensity and duration of exposure, on the physiology of plants, serves as the basis for the creation of effective light sources for protected ground.

**Purpose.** Comparative test of the influence of a light environment with different spectral composition on the productivity and quality of tomatoes in conditions of intensive photo culture.

**Methods.** Investigations were made under controlled conditions of intensive photoculture when growing dwarf tomatoes of the variety Natasha selections of the "Federal Scientific Vegetable Center" on thin-layer soil analogs with the supply of a nutrient solution to the plant roots through a slit capillary in vegetative light installations developed at the ARI. The light sources were high-pressure sodium lamps and LED lamps SD1, SD2, and SD3 with different emission spectra.

**Results.** Tomatoes of the Natasha variety, illuminated during development with HPS lamps, formed almost the same yield with an average fruit weight of 42.5 kg/m<sup>2</sup> per layer per year. Natasha tomato grown under LED lamps showed a tendency to lower productivity by 29% under SD1 and by 8% under SD2 and higher by 19% under underSD3 compared to that under HPS lamps. A comparative assessment of the biochemical composition of tomato fruits indicates their high quality under all tested light sources.

**Conclusion.** Cultivation of dwarf tomato varieties on thin-layer soil analogs showed the best results in terms of productivity with good quality plant products under LED lamps SD3 with a radiation spectrum close to sunlight.

**Keywords:** radiation spectrum, LED, HPS, Natasha variety, productivity, quality, growth

**Введение**

Свет является одним из важнейших факторов окружающей среды, который влияет на развитие растений и регулирует их рост [1]. Выращивание растений в условиях искусственного освещения с одной стороны имеет практический интерес для получения растительной продукции в климатических условиях, где солнечный свет имеет кратковременную и низкую интенсивность [2], с другой стороны, фундаментальным является развитие представлений о влиянии световой среды – качества света (спектр излучения), количества (интенсивности), продолжительности воздействия (соотношение световой и темновой фаз), на физиологию растений, что и служит впоследствии основой для создания эффективных источников света для защищенного грунта.

В условиях интенсивной светокультуры, предназначенной для получения высокопродуктивных форм, в том числе с помощью методов ускоренной селекции [3], в качестве источников света обычно используют облучатели на основе натриевых ламп высокого давления, хорошо зарекомендовавших себя и широко применяемых в защищенном грунте [4-6]. При этом динамично развивающиеся светодиодные технологии также привели к большому прогрессу в культивировании растений – за счет их использования можно управлять ростом и вторичным метаболизмом растений [7]. Светодиодное освещение является многообещающей альтернативой используемым в растениеводстве источникам света. Применение в фабриках растений и сити-фермерстве светодиодных технологий является выгодным вариантом как в плане эксплуатационных расходов [8,9], многоярусного выращивания овощей [10], так и в отношении возможностей по регулированию интенсивности излучения и его спектрального состава исходя из потребностей растений [11].

В настоящее время уже разработан ряд источников света на основе светодиодов, предназначенных для использования в растениеводстве. В большинстве светодиодных фитосветильниках наиболее распространено использование синих (450-480 нм) и красных (640-660 нм) светодиодов [12], что связано с эффективным поглощением этих длин волн фотосинтетическими пигментами (хлорофиллами) [13]. Узкополосное излучение от светодиодов облегчает исследования роли конкретных длин волн на морфологию и развитие растений. Одинаково большое количество исследований показывают, что растениям необходим полный спектр излучения в видимой области для реализации своего продукционного потенциала, при этом фотоны различной энергии по-разному усваиваются листовой поверхностью в зависимости от яруса, вида растений, вегетационного периода и др. [14,15]. Поэтому при изучении влияния узкой части спектра не всегда учитываются другие фотосинтетические процессы и светозависимые реакции, иницииру-

емые поглощением в остальном диапазоне видимого спектра или действием комбинированного излучения света различных длин волн. Кроме того, возможен и негативный эффект, например, излучение красных и синих светодиодов может приводить к ингибированию генеративного развития растения, при облучении синим светом наблюдается синтез антоцианов в листьях и стеблях томатов на стадии плодоношения, что в конечном итоге снижает продуктивность растений [16].

Применение полноспектральных в области фотосинтетически активной радиации источников света является перспективным направлением для светокультуры растений. Однако вопрос о наилучшем типе источника света остается открытым. Светодиоды имеют свои преимущества в плане возможностей многоярусного размещения, низкой температуры нагрева, энергоэффективности и др. Но для получения высоких показателей продуктивности и качества растительной продукции, уже достигнутых с использованием натриевых ламп, светодиодные светильники требуют модернизации устройства.

Цель данного исследования заключалась в сравнительном испытании влияния источников света различного спектрального состава на продуктивность и качество растительной продукции в условиях интенсивной светокультуры.

**Материалы и методы**

Исследования проводили на базе агробиополигона ФГБНУ АФИ в регулируемых условиях интенсивной светокультуры – температуру воздуха поддерживали в пределах +22...24°C днем и +18...20°C ночью, относительную влажность воздуха – 65-70%.

Объектом исследований служили растения томата сорта Наташа селекции ФГБНУ «Федеральный центр овощеводства». Растения карликового типа развития, компактные, не требуют пасынкования, подходящие для выращивания гидропонным методом в узкостеллажных и многоярусных светоустановках. Томат выращивали по разработанной в ФГБНУ АФИ технологии тонкослойной панопоники (ТАП) в вегетационной установке ярусного типа [17]. Источником минеральных элементов питания служил раствор Кнопа. В растительные формировали 25 растений на м<sup>2</sup>.

Сравнительную оценку влияния излучения с различным спектральным составом на растения томата проводили с использованием четырех типов источников света – дуговых натриевых зеркальных ламп (ДНаЗ) и светодиодных светильников. В качестве экспериментальных вариантов источников света, различающихся по спектральным характеристикам, были выбраны: 1) лампы ДНаЗ-400, принятые за эталон, 2) СД1 – светодиодные светильники, излучающие желтый свет со спектром, приближенным к спектру натриевых ламп, 3) СД2 – светодиодные светильники, излучающие розовый свет, приближенные

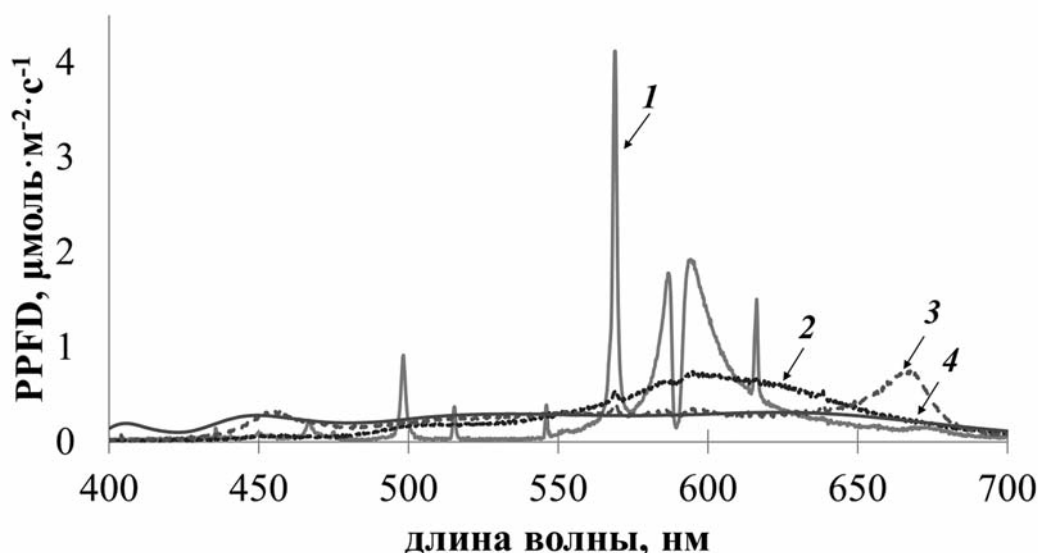


Рис. 1. Спектры излучения: 1 – дуговой натриевой зеркальной лампы, 2 – светодиодного светильника СД1, 3 – светодиодного светильника СД2, 4 – светодиодного светильника СД3  
 Fig. 1. Radiation spectra: 1 – high-pressure sodium arc lamp (HPS), 2 – LED lamp SD1, 3 – LED lamp SD2, 3 – LED lamp SD3

Таблица 1. Соотношение интенсивностей пиков спектра излучения и плотность фотосинтетического потока фотонов (PPFD – photosynthetic photon flux density) в разных диапазонах для использованных источников света  
 Table 1. The emission spectrum peaks intensities ratio and density of the photosynthetic photon flux density (PPFD) in different ranges for the used light sources

Источник света	ДНаЗ-400	Светодиодный светильник СД1	Светодиодный светильник СД2	Светодиодный светильник СД3
Соотношение интенсивностей на выраженных максимумах (длина волны)	1 (450 нм): 3 (465 нм): 13 (500 нм): 5 (515 нм): 5 (545 нм): 64 (570 нм): 28 (585 нм): 30 (595 нм): 23 (615 нм): 2 (670 нм)	1 (450 нм): 13 (595 нм)	1 (450 нм): 3 (665 нм)	1 (400 нм): 2 (450 нм): 2 (530 нм): 2 (625 нм)
PPFD в области 400-700 нм, $\mu\text{моль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	341±24 (+72 в ИК до 1000 нм)	342±24	332±23	339±21
PPFD в области 400-500 нм, $\mu\text{моль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	29	23	61	76
PPFD в области 500-600 нм, $\mu\text{моль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	185	156	123	130
PPFD в области 600-700 нм	127	163	148	133

к используемым в тепличных комплексах, 4) СД3 – светодиодные светильники со спектральным составом в видимой области, приближенным к солнечному свету, с помощью специализированной вторичной оптики.

Величину фотосинтетически активного потока фотонов (PPFD – photosynthetic photon flux density) установили для всех вариантов одинаковую –  $340\pm 20 \mu\text{моль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$  с продолжительностью светового периода 16 часов в сутки. На рис. 1 приведены спектры излучения использованных источников света в единицах плотности фотосин-

тетического потока фотонов (PPFD – photosynthetic photon flux density), полученные следующим образом: спектры измерены в относительных единицах с помощью интегрирующей сферы и ПЗС-спектрометра CCS200 (Thorlabs, США) [18], усреднены по всей поверхности выращивания и относительные единицы переведены в PPFD на основе алгоритма, предложенного в [19].

В таблице 1 приведены рассчитанные значения PPFD для полного диапазона видимого спектра от 400 до 700 нм и для его условно разделенных частей – синего (400-

700нм), зеленого (500-600 нм) и красного (600-700 нм) диапазонов, также в ней указаны соотношения основных пиков в спектрах излучения использованных источников света – ламп ДНаЗ и светодиодных светильников.

Реакцию овощной культуры на моделируемые условия световой среды оценивали по показателям роста, продуктивности и биохимическому составу получаемой растительной продукции. На протяжении вегетационных периодов также проводили фенологические наблюдения. При уборке учитывали массу и число плодов, определяли содержание витамина С, нитратов, тяжелых металлов и других биохимических показателей. Биохимический состав растительной продукции, характеризующий ее качество и безопасность, определяли в аккредитованной на техническую компетентность и независимость Испытательной лаборатории ФГБНУ АФИ в соответствии с требованиями современных нормативных документов и по общепринятым методикам [20-22].

Статистическая обработка экспериментальных данных проведена с помощью программного обеспечения MS Excel 2010. В тексте и таблицах приведены средние арифметические значения параметров и их доверительные интервалы при 95%-ном уровне вероятности по t-критерию. Достоверность различий между вариантами оценивали методами параметрической статистики, различия считали достоверными при  $p \leq 0.05$ .

### Результаты и их обсуждение

Проведенные испытания по исследованию влияния световой среды с различными спектральными характеристиками на развитие растений томата сорта Наташа в

интенсивной светокультуре показали, что лучшие результаты по продуктивности и качеству растительной продукции достигнуты при использовании источников света со спектром, максимально приближенным к солнечному. При выращивании растений томата урожайность в среднем достигала 8,5 кг/м<sup>2</sup> под лампами ДНаЗ-400, 6,6 кг/м<sup>2</sup> – под СД1, 7,9 кг/м<sup>2</sup> – под СД2 и 10,5 кг/м<sup>2</sup> – под СД3 (табл. 2) с одного яруса за один вегетационный период. Выращенные под светодиодными светильниками СД1 растения томата показали достоверное снижение массы плода на 27%, а под СД3 – наоборот, увеличение на 25% по сравнению с таковой под лампами ДНаЗ-400.

Сравнительная оценка биохимического состава плодов томата сортов Наташа свидетельствует о высоком их качестве под всеми тестируемыми источниками света (табл. 3). По содержанию нитратов и тяжелых металлов растительная продукция томатов полностью соответствует гигиеническим нормативам РФ.

Светодиодные светильники СД1, близкие по спектральному составу газоразрядным натриевым лампам ДНаЗ, преимущественно не вызывали значимых изменений в химическом составе растений за исключением увеличения содержания нитратов на 12 % относительно такового под лампами ДНаЗ. Светодиодные светильники СД2, наоборот, привели к существенным изменениям в качественном составе плодов томата. В них отмечается более высокое содержание витамина С – на 33%, содержание зольных элементов (сырая зола) – на 2% (тенденция), содержания нитратов – на 32% по сравнению с растениями, освещаемыми в процессе роста лампами ДНаЗ. Под светодиодными светильниками СД3 биохими-

Таблица 2. Показатели продуктивности томата при культивировании растений на ТАП под различными источниками света в регулируемых условиях  
Table 2. Productivity of tomato when cultivating plants on thin-layer soil analog in controlled conditions under various light sources

Параметр	Лампы ДНаЗ-400	Светодиодные светильники		
		СД1	СД2	СД3
Высота растения, см	38,3±2,0	28,7±4,1*	27,3±5,2*	29,5±4,3
Масса плода, г	7,1±0,5	5,6±0,5*	7,0±1,0	9,5±0,9*
Продуктивность, шт./растение	48±6	47±10	45±7	44±5
Продуктивность, г/растение	340,8±66,6	266,0±51,0	311,5±73,0	415,2±82,4
Урожайность, шт./м <sup>2</sup>	1200±150	1175±250	1125±175	1100±125
Урожайность, кг/м <sup>2</sup>	8,5±1,8	6,6±1,5	7,9±2,2	10,5±1,3

Примечание: \* - значение достоверно отличается от контроля (лампы ДНаЗ-400) на 5%-ном уровне значимости

Таблица 3. Показатели качества и безопасности плодов томата при культивировании растений на ТАП под различными источниками света в регулируемых условиях  
 Table 3. Quality and safety of tomato when cultivating plants on thin-layer soil analog in controlled condition under various light sources

Параметр	Лампы ДНаЗ-400	Светодиодные светильники		
		СД1	СД2	СД3
Влажность, %	94,2	92,4	93,2	95,6
Витамин С, мг/100 г н.в.	18,5	18	24,6	27,5
Сырая зола, % а.с.в.	10,1	10,75	10,32	9,62
Нитраты, мг/кг н.в.	52,9	59,3	69,7	47,4
Свинец, мг/кг н.в.	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Кадмий, мг/кг н.в.	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01

ческий состав также менялся: наблюдалось более высокое содержание витамина С – на 32%, тенденция к снижению содержания микроэлементов почти на 5%, уменьшение количества нитратов на 12% относительно данных для варианта облучения натриевыми лампами.

К основным отличиям спектрального состава излучения натриевых ламп от светодиодов можно отнести наличие ИК-диапазона и более узкие полосы излучения шириной ~5 нм и более. Так как количество фотонов в основных диапазонах спектра для ДНаЗ и СД1 схоже, но при этом присутствуют значимые различия в показателях продуктивности, можно предположить, что решающую положительную роль играет тепловой диапазон и участки спектра в ИК области, поглощаемые не только фотосинтетическим аппаратом, но и, например, водой. При этом наличие излучения в синем диапазоне спектров светильников СД2 и СД3 приводит к практически такой же продуктивности в случае с СД2, и более высоким показателям при облучении СД3 по сравнению с освещением лампами ДНаЗ.

Таким образом, при выращивании растений томата карликового сорта Наташа на ТАП под испытываемыми источниками света во всех вариантах опыта растительная продукция соответствовала санитарно-гигиеническим нормативам РФ.

### Заключение

Применение натриевых ламп высокого давления, которые излучают преимущественно желто-красный свет, имеет широкое распространение в тепличных хозяйствах благодаря высокому КПД, однако в спектре излучения таких ламп практически отсутствует синяя компонента. Солнечный же спектр содержит в себе все функциональные длины волн – как для работы фотосинтетического аппарата с максимумами поглощения света в синей и

красной областях спектра, так и для реализации вторичных процессов – от аккумуляирования энергии до активации защитных механизмов в растениях.

Смоделировать и реализовать фотосинтетически активный и физиологически значимый спектр излучения для растений можно с помощью светодиодных технологий – комбинируя различные светодиоды или используя вторичную оптику. Подбор комбинации светодиодов с целью реализации спектра, приближенного к солнечному излучению, является довольно трудной и тяжело решаемой задачей. Однако она была решена индустриальным партнером ФГБНУ АФИ путем создания полимера-люминофора, позволившего добиться светового излучения максимально приближенного к солнечному свету в видимой области спектра. Проведенное нами тестирование выявило, что в условиях интенсивной светокультуры показатели продуктивности томата при выращивании на тонкослойном аналоге почвы под светодиодным источником света со спектром близким к солнечному превышают таковые под эталонной натриевой лампой, что в условиях одинаковой облученности до этого не удавалось получить ни для одного светодиодного светильника (включая красно-бело-синий, варианты белого и моделирующий спектр натриевой лампы).

Показанное нами преимущество спектра излучения, приходящего на растение, приближенное к солнечному свету, говорит о решающей роли всего диапазона длин волн в видимой области спектра – это осуществление фотосинтетических реакций: аккумуляция и преобразование энергии света; регуляция вторичных процессов: синтез метаболитов, защитных соединений и др.; процессы в живом листе – рассеяние на органеллах и т.д.; а также о значительной роли ИК-составляющей – соотношение красный/дальний красный является пусковым сигналом, воспринимаемым фитохромами.

**Об авторах:**

**Татьяна Эдуардовна Кулешова** – кандидат физ.-мат. наук, научный сотрудник ФГБНУ АФИ, <https://orcid.org/0000-0003-3802-2494>, [www.piter.ru@bk.ru](mailto:www.piter.ru@bk.ru)

**Ольга Рудольфовна Удалова** – кандидат с.-х. наук, ведущий научный сотрудник ФГБНУ АФИ, <https://orcid.org/0000-0003-3521-0254>

**Ирина Тимофеевна Балашова** – доктор биол. наук, главный научный сотрудник лаб. новых технологий ФГБНУ ФНЦО, <https://orcid.org/0000-0001-7986-2241>

**Людмила Матвеевна Аникина** – кандидат биол. наук, ведущий инженер ФГБНУ АФИ, <https://orcid.org/0000-0001-5217-174X>

**Павел Юрьевич Конончук** – ведущий научный сотрудник ФГБНУ АФИ, <https://orcid.org/0000-0003-0449-5189>

**Галина Владимировна Мирская** – кандидат биол. наук, ведущий научный сотрудник ФГБНУ АФИ, <https://orcid.org/0000-0001-6207-736x>

**Гаянэ Геннадьевна Панова** – кандидат биол. наук, ведущий научный сотрудник, зав. отделом ФГБНУ АФИ, <https://orcid.org/0000-0002-1132-9915>

**About the authors:**

**Tatyana E. Kuleshova** – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Researcher ARI, <https://orcid.org/0000-0003-3802-2494>, [www.piter.ru@bk.ru](mailto:www.piter.ru@bk.ru)

**Olga R. Udalovala** – Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher ARI, <https://orcid.org/0000-0003-3521-0254>

**Irina T. Balashova** – Dr. Sci. (Biology), chief scientific officer of the laboratory of new technologies FSBSI FSVS, <https://orcid.org/0000-0001-7986-2241>

**Lyudmila M. Anikina** – Cand. Sci. (Biology), Leading Engineer ARI, <https://orcid.org/0000-0001-5217-174X>

**Pavel Yu. Kononchuk** – leading researcher ARI, <https://orcid.org/0000-0003-0449-5189>

**Galina V. Mirskaya** – Cand. Sci. (Biology), leading researcher ARI, <https://orcid.org/0000-0001-6207-736x>

**Gayane G. Panova** – Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher ARI, <https://orcid.org/0000-0002-1132-9915>

## • Литература

- Whitelam G.C., Halliday K.J. Annual plant reviews, light and plant development. NY: John Wiley & Sons, 2008.
- Harvey R.B. Growth of plants in artificial light. Botanical Gazette. 1922;74(4):447-451.
- Kochetov A.A., Sinyavina N.G. Создание новых форм редиса и редьки (*Raphanus sativus* L.) с прогнозируемым комплексом хозяйственно ценных признаков при использовании методологии ускоренной селекции. Картофель и овощи. 2019;(10):29-34. DOI:10.25630/PAV.2019.70.54.003
- Судаков В.Л., Хомяков Ю.В. Интенсивная светокультура растений. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. DOI: 10.25695/agropysica.2018.55.17767
- Аникина Л.М., Конончук П.Ю., Судаков В.Л., Удалова О.Р., Хомяков Ю.В. Агротехнологии малообъемной и бесубстратной интенсивной светокультуры огурца. Овощи России. 2017;(2):65-69. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2017-2-65-69>
- Удалова О.Р., Аникина Л.М., Хомяков Ю.В., Вертебный В.В., Дубовицкая В.И., Панова Г.Г. Влияние тонкослойных аналогов почвы на продукционный процесс растений салата в интенсивной светокультуре. Овощи России. 2021;(1):33-38. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2021-1-33-38>
- Ouzounis T., Rosenqvist E., Ottosen C. O. Spectral effects of artificial light on plant physiology and secondary metabolism: a review. HortScience. 2015;50(8):1128-1135. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.50.8.1128>
- Darko E., Heydarizadeh P., Schoefs B., Sabzalain M.R. Photosynthesis under artificial light: the shift in primary and secondary metabolism. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. 2014;369(1640):20130243. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0243>
- Karlicek R., Sun C.C., Zissis G., Ma R. Handbook of advanced lighting technology. Switzerland: Springer, 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-00176-0>
- Дорохов А.С., Старостин И.А., Чилингарян Н.О., Дорохов А.А. Состояние и перспективы развития овощеводства закрытого грунта в Российской Федерации. Аграрная Россия. 2019;(10):45-48. DOI: 10.30906/1999-5636-2019-10-45-48
- Смирнов А.А., Прошкин Ю.А., Довлатов И.М., Соколов А.В., Качан С.А. Разработка фитооблучателей на основе светодиодов с настроиваемым соотношением спектра ФАР. Инновации в сельском хозяйстве. 2019;(4):247-254.
- Соколов А.В., Рошин О.А., Качан С.А. Испытание светодиодных установок для облучения растений без внешнего освещения. Инновации в сельском хозяйстве: Электронный журнал. 2017;(2):128-132.
- Sager J.C., McFarlane J.C. Radiation. Plant growth chamber handbook. 1997. P. 1-29.
- Brodersen C.R., Vogelmann T.C. Do changes in light direction affect absorption profiles in leaves? Funct. Plant Biol. 2010;(37):403-412. <https://doi.org/10.1071/FP09262>
- Kuleshova T.E., Gall N.R., Chernousov I.N., Udalovala O.R., Khomyakov Y.V., Aleksandrov A.V., Panova G.G., Seredin I.S., Shcheglov S.A. Influence of lighting spectral characteristics on the lettuce leaf optical properties. Journal of Physics: Conference Series. 2019;1400(3):033025. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1400/3/033025>
- Смирнов А.А. Зависимость биосинтеза пигментов и продуктивности томата от спектрального состава излучения. Инновации в сельском хозяйстве. 2018;(3):78-86.
- Панова Г.Г., Удалова О.Р., Канаш Е.В., Галушко А.С., Кочетов А.А., Прияткин Н.С., Архипов М.В., Черноусов И.Н. Основы физического моделирования. Журнал технической физики. 2020;.90(10):1633-1639. DOI: 10.21883/JTF.2020.10.49792.429-19
- Kuleshova T.E., Seredin I.S., Shcheglov S.A., Blashenkov M.N., Chumachenko A.V., Feofanov S.V., Kiradiev V.K., Odnoblyudov M.A. Spectrometric method for measuring light absorption by plant leaves. Journal of Physics: Conference Series. 2018;1135(1):012013. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1135/1/012013>
- Кулешова Т.Э., Блашенков М.Н., Кулешов Д.О., Галль Н.Р. Разработка лабораторного фитотрона с возможностью варьирования спектра излучения и длительности суточной экспозиции и его биологическое тестирование. Научное приборостроение. 2016;26(3).
- Тутельян В.А., Беляев Е.Н. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. СанПиН 2.3. 2.1078. М.: ФГУП «ИнтерСЭН». 2002.
- Ермаков А.И., Арасимович В.В., Ярош Н.П. Методы биохимического исследования растений. Л.: Агропромиздат, 1987.
- Скурихин И.М., Тутельян В.А. Руководство по методам анализа качества и безопасности пищевых продуктов. М: Брандес – Медицина, 1998.

## • References

- Whitelam G.C., Halliday K.J. Annual plant reviews, light and plant development. NY: John Wiley & Sons, 2008.
- Harvey R.B. Growth of plants in artificial light. Botanical Gazette. 1922;74(4):447-451.
- Kochetov A.A., Sinyavina N.G. Creation of new forms of radish and radish (*Raphanus sativus* L.) with a predictable complex of economically valuable traits using the methodology of accelerated selection. Potatoes and vegetables. 2019;(10):29-34. (In Russ.) DOI:10.25630/PAV.2019.70.54.003
- Sudakov V.L., Khomyakov Yu.V. Intensive photoculture of plants. SPb.: Publishing house of Polytechnic. University, 2018. DOI: 10.25695/agropysica.2018.55.17767 (In Russ.)
- Anikina L.M., Kononchuk P.Yu., Sudakov V.L., Udalovala O.R., Khomyakov Yu.V. AGrotechnology of small-volume and non-soil intense light-culture in cucumber. Vegetable crops of Russia. 2017;(2):65-69. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2017-2-65-69>
- Udalova O.R., Anikina L.M., Khomyakov Yu.V., Vertebnyi V.E., Dubovitskaya V.I., Panova G.G. Influence of thin-layer soil analogues on the production process of lettuce plants in intensive artificial-light culture. Vegetable crops of Russia. 2021;(1):33-38. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2021-1-33-38>
- Ouzounis T., Rosenqvist E., Ottosen C. O. Spectral effects of artificial light on plant physiology and secondary metabolism: a review. HortScience. 2015;50(8):1128-1135. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.50.8.1128>
- Darko E., Heydarizadeh P., Schoefs B., Sabzalain M.R. Photosynthesis under artificial light: the shift in primary and secondary metabolism. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. 2014;369(1640):20130243. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0243>
- Karlicek R., Sun C.C., Zissis G., Ma R. Handbook of advanced lighting technology. Switzerland: Springer, 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-00176-0>
- Dorokhov A.S., Starostin I.A., Chilingaryan N.O., Dorokhov A.A. State and prospects for the development of indoor vegetable growing in the Russian Federation. Agrarian Russia. 2019;(10):45-48. DOI: 10.30906/1999-5636-2019-10-45-48 (In Russ.)
- Smirnov A.A., Proshkin Yu.A., Dovlatov I.M., Sokolov A.V., Качан S.A. Development of phyto-irradiators based on LEDs with adjustable PAR spectrum ratio. Agricultural innovations. 2019;(4):247-254. (In Russ.)
- Sokolov A.V., Roshchin O.A., Качан S.A. Testing of LED installations for irradiating plants without external lighting. Agricultural Innovation: An Electronic Journal. 2017;(2):128-132 (In Russ.)
- Sager J.C., McFarlane J.C. Radiation. Plant growth chamber handbook. 1997. P. 1-29.
- Brodersen C.R., Vogelmann T.C. Do changes in light direction affect absorption profiles in leaves? Funct. Plant Biol. 2010;(37):403-412. <https://doi.org/10.1071/FP09262>
- Kuleshova T.E., Gall N.R., Chernousov I.N., Udalovala O.R., Khomyakov Y.V., Aleksandrov A.V., Panova G.G., Seredin I.S., Shcheglov S.A. Influence of lighting spectral characteristics on the lettuce leaf optical properties. Journal of Physics: Conference Series. 2019;1400(3):033025. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1400/3/033025>
- Smirnov A.A. Dependence of pigment biosynthesis and tomato productivity on the spectral composition of radiation. Agricultural innovations. 2018;(3):78-86. (In Russ.)
- Panova G.G., Udalovala O.R., Kanash E.V., Galushko A.S., Kochetov A.A., Priyatkin N.S., Arkhipov M.V., Chernousov I.N. Fundamentals of Physical Modeling. Technical Physics Journal. 2020;90(10): 1633-1639. (In Russ.) DOI: 10.21883/JTF.2020.10.49792.429-19
- Kuleshova T.E., Seredin I.S., Shcheglov S.A., Blashenkov M.N., Chumachenko A.V., Feofanov S.V., Kiradiev V.K., Odnoblyudov M.A. Spectrometric method for measuring light absorption by plant leaves. Journal of Physics: Conference Series. 2018;1135(1):012013. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1135/1/012013>
- Kuleshova T.E., Blashenkov M.N., Kuleshov D.O., Gall N.R. Development of a laboratory phytotron with the ability to vary the radiation spectrum and the duration of daily exposure and its biological testing. Scientific instrumentation. 2016; 26 (3). (In Russ.)
- Tutelyan V.A., Belyaev E.N. Hygienic requirements for food safety and nutritional value. SanPiN 2.3. 2.1078. M.: FGUP "InterSEN. 2002. (In Russ.)
- Ermakov A.I., Arasimovich V.V., Yarosh N.P. Biochemical research methods of plants. L.: Agropromizdat, 1987. (In Russ.)
- Skurikhin IM, Tutelyan VA, Guide to methods of analysis of food quality and safety. M: Brandes - Medicine, 1998. (In Russ.)