



Научная статья/Research Article

УДК 633.82:635.037

DOI: 10.36718/1819-4036-2026-6-3-15

Андрей Владимирович Титенков^{1✉}, Инна Валерьевна Князева²

^{1,2}Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия

¹tiandr1996@yandex.ru

²knyazewa.inna@yandex.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА ОСВЕЩЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОДУКТИВНОСТИ ТИМЬЯНА В ГИДРОПОННЫХ УСЛОВИЯХ

Цель исследования – оценка влияния девяти различных спектральных режимов освещения при постоянной интенсивности фотосинтетически активной радиации (ФАР 150 мкмоль/(м² · с)) на формирование надземной биомассы и содержание эфирного масла тимьяна обыкновенного. Объект исследования – вегетативно размноженные растения тимьяна обыкновенного (*Thymus vulgaris* L.) сорта Крымрозовец в гидропонных условиях, выращиваемые в течение 190 сут на стеллажной установке. Контрольный вариант по составу спектра был максимально приближен к солнечному свету. Исследуемые режимы включали монохроматические излучения (синее, красное) и их разное соотношение, а также комбинации белого света с добавлением ультрафиолета и дальнего красного. Анализ полученных данных показал, что спектральный состав оказывал значимое воздействие как на ростовые показатели, так и на биосинтез эфирного масла. Монохроматическое освещение синим и красным светом приводило к существенному угнетению роста (снижению массы на 41,3 и 37,2 % соответственно) и значительному снижению содержания эфирного масла (на 37,4 и 29,7 %). Напротив, оптимальный результат был достигнут при использовании комбинированного освещения с равным соотношением синего и красного спектров (по 69 мкмоль/(м² · с)) и небольшой долей зеленого (12 мкмоль/(м² · с)). Данный режим обеспечил максимальный прирост надземной массы – на 37,2 % и увеличение содержания эфирного масла на 19,2 %, что в итоге позволило повысить общий выход эфирного масла с одного растения на 63,5 % по сравнению с контролем. Исследование показало высокую эффективность целенаправленного управления спектральным составом светодиодного освещения для интенсификации выращивания тимьяна в условиях гидропоники. Оптимальным для увеличения как биомассы, так и содержания эфирного масла у изученного сорта тимьяна являлся режим с равными долями синего и красного излучения. Результаты имеют практическую ценность для разработки специализированных световых протоколов в высокотехнологичном производстве стандартизированного лекарственного и эфиромасличного сырья с заданными свойствами.

Ключевые слова: тимьян, эфирное масло, аминокислоты, гидропоника

Для цитирования: Титенков А.В., Князева И.В. Оптимизация спектрального состава освещения для повышения продуктивности тимьяна в гидропонных условиях // Вестник КрасГАУ. 2026. № 6. С. 3–15. DOI: 10.36718/1819-4036-2026-6-3-15.

Финансирование: исследование проведено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FGUN-2025-0008.

Andrey Vladimirovich Titenkov^{1✉}, Inna Valeryevna Knyazeva²^{1,2}All-Union Research Institute of Agricultural Mechanization, Moscow, Russia¹tiandr1996@yandex.ru²knyazewa.inna@yandex.ru

OPTIMIZING LIGHTING SPECTRAL COMPOSITION TO INCREASE THYME PRODUCTIVITY IN HYDROPONIC CONDITIONS

The aim of the study is to evaluate the effect of nine different spectral lighting regimes at a constant photosynthetically active radiation (PAR, 150 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) on the formation of aboveground biomass and essential oil content of common thyme. The study subjects were vegetatively propagated common thyme (*Thymus vulgaris* L.) cultivar Krymrozovets plants grown hydroponically for 190 days on a rack system. The control variant had a spectral composition that was as close as possible to sunlight. The studied modes included monochromatic radiation (blue, red) and their different ratios, as well as combinations of white light with the addition of ultraviolet and far-red light. Analysis of the obtained data showed that the spectral composition had a significant impact on both growth indicators and essential oil biosynthesis. Monochromatic illumination with blue and red light led to significant growth inhibition (a decrease in weight by 41.3 and 37.2 %, respectively) and a significant decrease in essential oil content (by 37.4 and 29.7 %). Conversely, the optimal result was achieved using combined lighting with an equal ratio of blue and red spectra (69 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) and a small proportion of green (12 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$). This regimen provided the maximum increase in aboveground mass – by 37.2 % and an increase in essential oil content by 19.2 %, which ultimately made it possible to increase the total yield of essential oil per plant by 63.5 % compared to the control. The study demonstrated the high efficiency of targeted control of the spectral composition of LED lighting for intensifying thyme cultivation in hydroponics. A regime with equal proportions of blue and red light was optimal for increasing both biomass and essential oil content in the studied thyme variety. The results of the study have practical value for the development of specialized lighting protocols in the high-tech production of standardized medicinal and essential oil raw materials with desired properties.

Keywords: thyme, essential oil, amino acids, hydroponics

For citation: Titenkov AV, Knyazeva IV. Optimizing lighting spectral composition to increase thyme productivity in hydroponic conditions. *Bulletin of KSAU*, 2026;6:3-15. DOI: 10.36718/1819-4036-2026-6-3-15.

Funding: the study was conducted under the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation FGUN-2025-0008.

Введение. К представителям семейства Яснотковых, или Губоцветных (*Lamiaceae*), относится обширная группа растений, имеющих исключительное хозяйственное значение благодаря высокому содержанию вторичных метаболитов. Данное семейство объединяет многочисленные лекарственные и эфиромасличные культуры, которые на протяжении веков используются в народной и официальной медицине, кулинарии, парфюмерии и ароматерапии. Их ценность обусловлена прежде всего уникальным и разнообразным химическим составом, служащим богатым источником биологически активных веществ (БАВ) различной природы: терпеноидов (моно- и сесквитерпенов), фенольных соединений (флавоноидов, фенолкарбоновых кислот), иридоидов и алкалоидов [1].

Эти природные соединения демонстрируют широкий спектр фармакологической активности (антимикробную, антиоксидантную, противовос-

палительную, спазмолитическую и др.), что открывает широкие перспективы для их практического применения в современных технологиях. Потенциал БАВ яснотковых реализуется в нескольких ключевых направлениях: в сельском хозяйстве – в качестве экологических биопестицидов и кормовых добавок, повышающих продуктивность животных; в пищевой промышленности – как натуральные консерванты и биологически активные добавки к пище функционального назначения; в фармацевтике и биомедицине – в виде сырья для разработки новых лекарственных препаратов, фитопрепаратов и нутрицевтиков. Таким образом, растения семейства *Lamiaceae* представляют собой важнейший растительный ресурс для биоэкономики, ориентированной на получение натуральных продуктов с высокой добавочной стоимостью [2].

Особый интерес в этом семействе как с научной, так и с коммерческой точки зрения пред-

ставляет род *Thymus* L. (Тимьян), включающий множество видов и подвидов (*T. vulgaris*, *T. carmanicus*, *T. pubescens*, *T. serpyllum* и др.), широко распространенных в Евразии и Северной Африке. Представители рода на протяжении тысячелетий используются в медицине, что подтверждено современными исследованиями их выраженных антибактериальных, противовирусных, противогрибковых, а также антиоксидантных и противовоспалительных свойств, обусловленных в первую очередь высоким содержанием фенольных соединений (тимола, карвакрола) и терпеноидов в эфирных маслах [3].

Тимьян обыкновенный (*Thymus vulgaris* L.) является одной из ключевых эфиромасличных культур мирового значения. Его эфирное масло стабильно входит в десятку наиболее востребованных на международном рынке, находя применение в фармацевтике, косметологии, пищевой промышленности и ароматерапии. Объем мирового рынка сухого сырья тимьяна оценивается приблизительно в 15 000 т в год, что свидетельствует о его стабильно высоком промышленном спросе. География производства имеет ярко выраженную региональную специализацию. Бесспорным лидером по объемам производства и экспорта является Турция, на долю которой приходится значительная часть мирового предложения. За ней с заметным отрывом следуют другие крупные производители – Мексика, Греция и Израиль. Основными странами-импортерами турецкого и мирового тимьяна, формирующими глобальный спрос, выступают США, Германия, Италия и Канада. Такая структура рынка подчеркивает его глобализованный характер и зависимость многих стран от импорта этого стратегически важного растительного сырья [4].

Российский рынок тимьяна в основном является импортозависимым. Основными странами-поставщиками сушеного тимьяна и его эфирного масла в РФ традиционно выступают упомянутые ведущие мировые производители. Спрос в России формируется преимущественно за счет пищевой промышленности, фармацевтического сектора и растущего рынка натуральной косметики и ароматерапии. В последние годы наблюдается тенденция к развитию собственного мелкотоварного и фермерского выращивания тимьяна в южных регионах страны (Краснодарский край, Крым, Северный Кавказ) для локального использования, однако объемы пока несопоставимы с импортом [5]. Таким образом, существующие природные популяции тимьяна не способны удовлетворить стабильно высокий и растущий спрос на его продукцию, что актуализирует задачу разработки эффективных агротехнических приемов для его культивирования.

Накопление и качественный состав эфирных масел у растений рода *Thymus* варьируют и сильно зависят от ряда факторов: погодноклиматических условий, применяемой технологии возделывания, а также фазы онтогенеза в момент уборки сырья [6]. Особую роль в морфогенезе растений и синтезе БАВ играет световой режим [7, 8]. Многочисленные исследования подтверждают, что спектральный состав света оказывает прямое влияние как на продуктивность эфиромасличных растений, так и на накопление и состав эфирных масел в них [9, 10]. Так, содержание эфирного масла в сухой биомассе тимьяна, по данным литературы, может колебаться от 0,3 до 4,0 % [11].

Управление спектральным составом освещения в гидропонных условиях представляет собой эффективный агротехнологический прием для направленного воздействия на физиологические и фитохимические процессы растений [12]. Данный подход позволяет целенаправленно повышать биомассу и концентрацию эфирного масла [13], что представляет значительный интерес для современной аграрной науки.

Цель исследования – оценка влияния девяти различных спектральных режимов освещения при постоянной интенсивности фотосинтетически активной радиации (ФАР, 150 мкмоль/м² · с) на формирование надземной биомассы и содержание эфирного масла тимьяна обыкновенного.

Задачи: выявить спектральные режимы, способствующие интенсификации фотосинтетических процессов, повышению продуктивности (накоплению зеленой массы), а также увеличению синтеза вторичных метаболитов, представляющих основную ценность у исследуемого сорта; определить влияние света на эфиромасличную продуктивность, поскольку исследуемый сорт характеризуется высоким содержанием линалоола, а не тимола.

Результаты исследования позволят научно обосновать рекомендации по подбору спектра светодиодного освещения для интенсификации культивирования тимьяна в технологиях защищенного грунта и вертикального земледелия с целью получения высокого урожая зеленой массы с высоким содержанием эфирного масла.

Объекты и методы. Объект исследования – тимьян обыкновенный (*Thymus vulgaris* L.), сорт Крымрозовец селекции НИИСХ Крыма (авторы Т.В. Платонова, А.А. Серкова). Растения высотой $(23,1 \pm 0,3)$ см, с прямостоячими стеблями, одревесневающими в нижней части. Листья светло-зеленые, мелкие, длиной 7–9 мм и шириной 2 мм, короткочерешковые. По данным конкурсного сортоиспытания, массовая доля эфирного масла в свежем сырье составляла $(0,651 \pm 0,045)$ %, или $(2,576 \pm 0,067)$ % в пересчете на абсолютно сухое сырье. Особенностью данного сорта, представляющей значительный интерес для фармацевтической и косметической промышленности, является уникальный хемотип синтезируемого эфирного масла. В отличие от большинства коммерческих сортов (*Thymus vulgaris* L.), у которых доминирующим компонентом является тимол (фенольный хемотип), у сорта Крымрозовец преобладает терпеновый спирт линалоол, содержание которого достигает $(81,0 \pm 0,4)$ %. Линалоол обладает комплексом выраженных биологических свойств, включая мощную антимикробную (антибиотическую), противовоспалительную, антиоксидантную, а также седативную и спазмолитическую активность [14, 15]. Это делает эфирное масло данного сорта ценным сырьем для создания продуктов с направленным фармакологическим

действием, превосходящим по некоторым параметрам традиционные тимольные масла. Выращивание такого сорта в контролируемых условиях позволяет целенаправленно получать стандартизированное сырье с высоким и стабильным содержанием целевого компонента.

Перед началом эксперимента был проведен этап укоренения зеленых черенков тимьяна длиной (5 ± 1) см. Черенки обрабатывали стимулятором корнеобразования «Корневин» и помещали в кубики из минеральной ваты. После успешного укоренения для опыта отобрали однородные растения ($n = 10$ на вариант), которые пересадили в торфяной субстрат.

Последующее выращивание тимьяна в течение 190 сут проводили на стеллажных установках с полностью контролируемым микроклиматом. Условия поддерживались на следующем уровне: температура воздуха (20 ± 2) °С, относительная влажность воздуха (65 ± 5) %, фотопериод 16 ч. Освещение обеспечивали светодиодными фитосветильниками с интенсивностью фотосинтетически активной радиации (ФАР) $150 \text{ мкмоль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Полив питательным раствором осуществляли ежедневно методом подтопления. Параметры питательного раствора поддерживали в диапазонах: электропроводность (ЕС) – 1,2–1,5 мСм/см, водородный показатель (pH) – 6,20–6,40 (рис. 1).



Рис. 1. Условия выращивания тимьяна
Growing conditions for thyme

Массовую долю эфирного масла в надземной биомассе растений определяли методом гидродистилляции с аппаратом Гинзберга. Для анализа использовали свежесрезанное сырье. Масса аналитической навески составляла 50 г, повторность опыта – трехкратная [16].

В экспериментах применяли программируемые светодиодные светильники (LED) лабораторной сборки (Агроинженерный центр ВИМ), изготовленные на основе светодиодов Shenzhen Refond Optoelectronics Co., Ltd (Китай). Светильники состояли из четырех типов свето-

диодов: белых светодиодов с цветовой температурой 4000 К, синих светодиодов (450 нм), светодиодов дальнего красного диапазона (730 нм) и красных светодиодов (630 нм), которые были объединены в светодиодные блоки (рис. 2–4). Электрическая мощность каждого светильника составляла до 30 Вт.

Измерения интенсивности освещения проводили на уровне растений с использованием спектрального измерителя ФАР МК350D Compact Spectrometer (UPRtek Corp., Miaoli County, Тайвань).

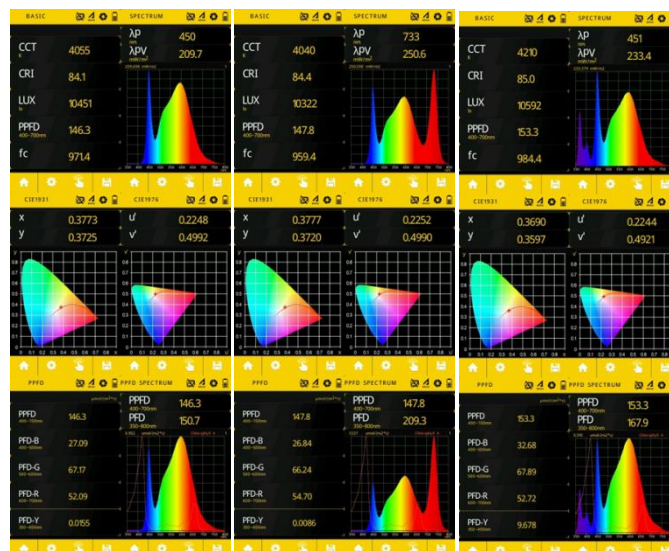


Рис. 2. Спектральный состав освещения растений светильником СИД белого спектра (контрольный вариант эксперимента), с добавлением УФ-А компонента, с добавлением дальнего красного (FR)
Spectral composition of plant illumination by a white-spectrum LED lamp (control experiment), with addition of UV-A component, with addition of far-red (FR)

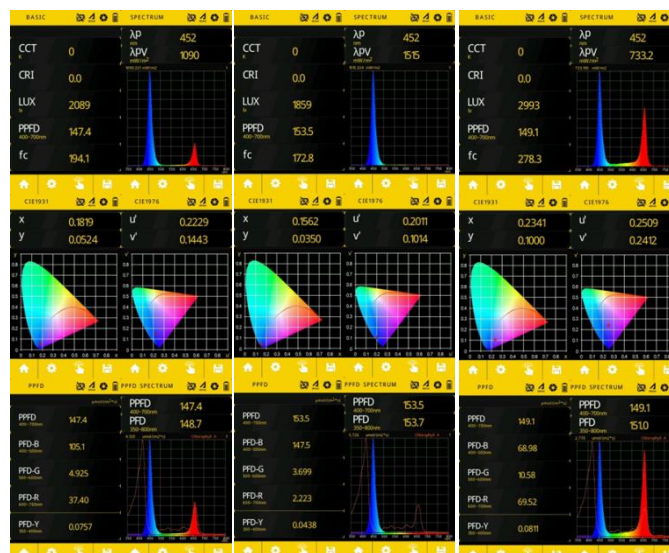


Рис. 3. Спектральный состав освещения растений светильником СИД: высокая доля синего (B), монохроматический синий (B), сбалансированный синий-красный (B = R)
Spectral composition of LED plant lighting: high blue (B) content, monochromatic blue (B), balanced blue-red (B = R)

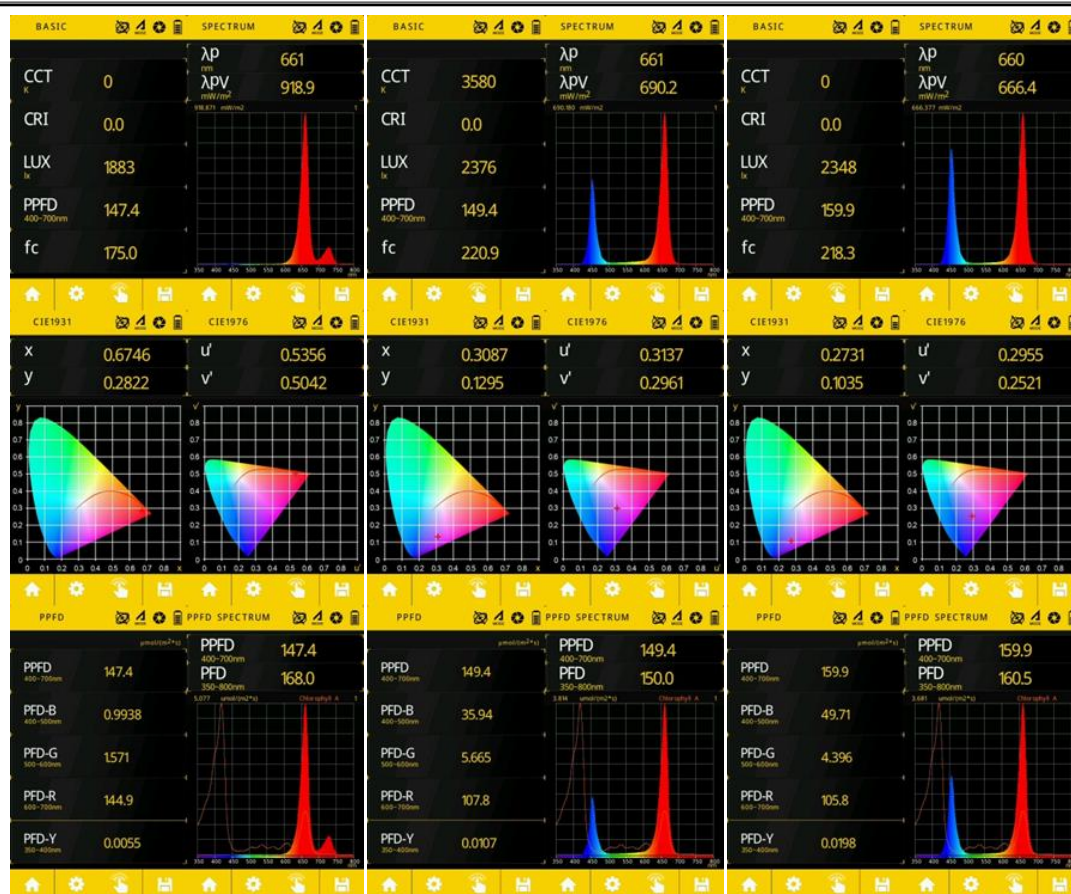


Рис. 4. Спектральный состав освещения растений светильником СИД: монохроматический красный (R), красный-доминированный ($R \gg B$), красный-доминированный ($R > B$)
Spectral composition of plant illumination by a monochromatic red LED (R), red-dominated ($R \gg B$), and red-dominated ($R > B$)

В ходе эксперимента было изучено влияние девяти режимов светодиодного освещения с различным спектральным составом в диапазоне длин волн от 380 до 780 нм. Интенсивность фотосинтетически активной радиации (ФАР) во всех опытных вариантах поддерживалась на постоянном уровне $150 \text{ мкмоль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Это позволило изолировать эффект именно спектрального качества света от влияния его общего энергетического потока.

Базовым (контрольным) являлся первый вариант, спектральный состав которого был приближен к солнечному излучению. Остальные восемь режимов представляли собой экспериментальные комбинации, целенаправленно изменяющие соотношение ключевых спектральных диапазонов: синего (B, 400–500 нм), зеленого (G, 500–600 нм), красного (R, 600–700 нм).

Для оценки влияния пограничных областей спектра в два режима были дополнительно включены ультрафиолетовая (UV, 380–400 нм) и дальняя красная (FR, 700–780 нм) компоненты. Таким образом, экспериментальные факторы варьировались от монохроматических и бихроматических комбинаций до полихроматических спектров с модификациями, что позволило оценить вклад каждого участка спектра в физиологию и продуктивность тимьяна. Детальные параметры всех девяти световых режимов представлены в таблице 1.

Статистическую обработку данных проводили с использованием дисперсионного анализа (ANOVA). Для post-hoc сравнения средних значений применяли критерий Дункана при уровне значимости $p \leq 0,05$.

Параметры спектрального состава освещения в экспериментальных вариантах: В – синий свет (400–500 нм), G – зеленый свет (500–600 нм), R – красный свет (600–700 нм), UV – ультрафиолетовый свет (~380–400 нм), FR – дальний красный свет (700–780 нм)
 Parameters of the spectral composition of lighting in experimental variants: B – blue light (400–500 nm), G – green light (500–600 nm), R – red light (600–700 nm), UV – ultraviolet light (~380–400 nm), FR – far red light (700–780 nm)

Номер варианта	Характеристика спектра	Спектральный состав, мкмоль/(м ² · с) (доля, %)
1	Контроль (белый спектр)	B:24 (16 %) : G:63 (42 %) : R:58 (39 %) : FR:5 (3 %)
2	С добавлением УФ-А компонента	B:27 (18 %) : G:61 (41 %) : R: 52 (35 %) : UV:10 (7 %)
3	С добавлением дальнего красного (FR)	B:30 (20 %) : G:61 (41 %) : R:49 (33 %) : FR:10 (7 %)
4	Высокая доля синего (B)	B:105 (70 %) : G:5 (3 %) : R:40 (27 %)
5	Монохроматический синий (B)	B: 144 (96 %) : G:4 (3 %) : %R:2 (1 %)
6	Сбалансированный синий-красный (B = R)	B:69 (46 %) : G:12 (8 %) : R:69 (46 %)
7	Монохроматический красный (R)	B:1 (1 %) : G: 2 (1 %) : R:147 (98 %)
8	Красный-доминированный (R >> B)	B:36 (24 %) : G:6 (4 %) : R:108 (72 %)
9	Красный-доминированный (R > B)	B:48 (32 %) : G:4 (3 %) : R:98 (65 %)

Результаты и их обсуждение. Проведенный дисперсионный анализ выявил статистически значимое влияние спектрального состава светодиодного освещения на накопление надземной биомассы и эфирного масла растений тимьяна, что согласуется с общепризнанной ролью качества света как регулятора роста и накопления продуктов метаболизма у растений [7, 9, 12]. Режим с преобладанием синего света (вариант 5, 96 % B) оказал выраженное ингибирующее действие на ростовые процессы, снизив массу растения на 41,3 % по сравнению с контролем (рис. 5). Синий свет, являясь сигналом о высоком фотосинтетическом потенциале и индуктором активности криптохромов и фототропинов, в высоких дозах часто приводит к торможению растяжения клеток, формированию более компактных и низкорослых растений с утолщенными листьями, что и привело к снижению надземной массы [7, 12]. Аналогичный отрицательный эффект наблюдался при монохроматическом красном освещении (вариант 7, 98 % R), где снижение составило 37,2 %. Доминирование красного света, активирующего преимущественно фитохромную систему, стимулирует растяжение стебля (удлинение междоузлий) и вытягивание растений, что часто сопряжено с уменьшением количества боковых побегов и общей листовой массы, приводя к снижению общей продуктивности [12]. Вариант

8 с высоким соотношением R : B = 3 : 1 также достоверно уступал контролю, демонстрируя снижение массы на 19,1 %. Напротив, комбинированные спектры стимулировали продукционный процесс. Максимальный прирост биомассы – 37,1 % относительно контроля был зафиксирован при соотношении синего и красного света 1 : 1 (вариант 6). Синергетический эффект от совместного действия синего и красного спектров хорошо известен: синий свет оптимизирует морфогенез и работу устьиц, а красный является основным драйвером фотосинтеза и растяжения клеток [9, 17]. Этот результат полностью коррелирует с данными, полученными при выращивании других представителей семейства яснотковых, таких как базилик, где подобное соотношение также приводило к максимальному приросту зеленой массы [18].

Варианты 2 (UV-A), 3 (FR) и 4 (B-доминированный), статистически не отличавшиеся как от контроля, так и от лучших вариантов, тем не менее показали тенденцию к увеличению массы. Наблюдаемая тенденция к увеличению биомассы при добавлении дальнего красного света (FR, вариант 3) согласуется с работами, демонстрирующими его роль в увеличении площади листовой поверхности и общей продуктивности растений за счет модуляции активности фитохромов и смещения баланса Phytochrome Photoequilibrium (PPE) [17].

Особенно важен прирост на 17,6 % при добавлении дальнего красного излучения (вариант 5), что свидетельствовало о его потенциальной роли в управлении морфогенезом. Полученный результат согласуется с данными, по-

лученными коллегами ранее. Так, добавление дальнего красного спектра способствовало увеличению площади листовой пластины, что приводило к увеличению массы растения [19].

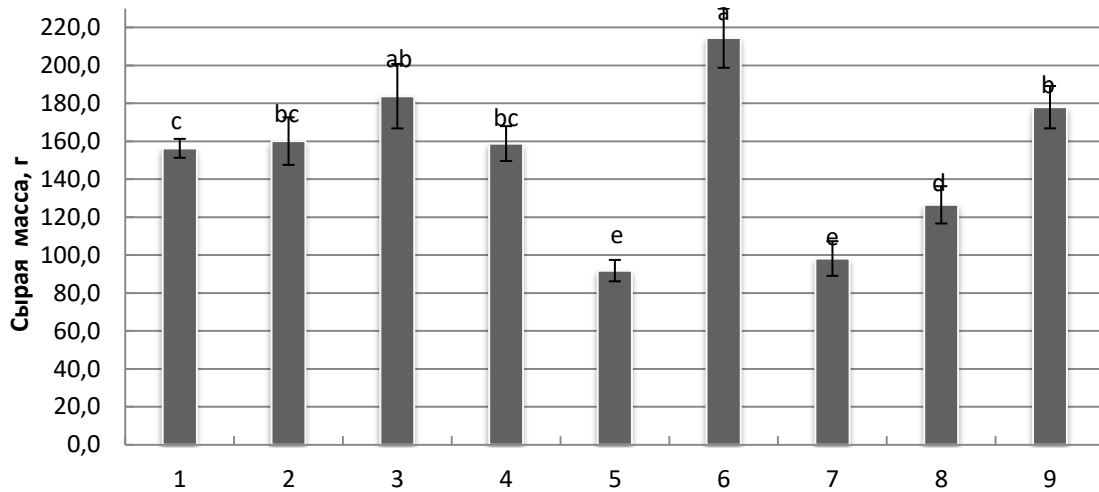


Рис. 5. Влияние спектра освещения на сырую массу тимьяна сорта Крымрозовец: 1 – контроль (аналог солнечного спектра); 2 – с добавлением УФ-А компонента; 3 – с добавлением дальнего красного (FR); 4 – высокая доля синего (B); 5 – монохроматический синий (B);

6 – сбалансированный синий-красный ($B = R$); 7 – монохроматический красный (R);

8 – красный-доминированный ($R >> B$); 9 – красный-доминированный ($R > B$)

The effect of the illumination spectrum on the raw mass of thyme of the Krymrozovets variety: 1 – control (analog of the solar spectrum); 2 – with the addition of UV-A component; 3 – with the addition of far red (FR); 4 – high proportion of blue (B); 5 – monochromatic blue (B); 6 – balanced blue-red ($B = R$);

7 – monochromatic red (R); 8 – red-dominated ($R >> B$); 9 – red-dominated ($R > B$)

Полученные результаты подтвердили, что изменение спектра света напрямую влияет на рост тимьяна. Растения, выращенные при комбинированном красном и синем освещении (варианты 6 и 9), показали наилучшие результаты по массе. Это означает, что совместное использование этих двух типов света наиболее эффективно стимулирует рост надземной массы растений. Выращивание только под синим или только под красным светом (варианты 5 и 7) вызывало у растений стресс, сильно замедляя их рост. В результате формировались небольшие, компактные растения. С одной стороны, такие условия полезны для изучения того, как тимьян адаптируется к стрессу. С другой стороны, компактная форма делает эти растения идеально пригодными для стеллажного выращивания в вертикальных фермах, где важно эффективно использовать ограниченное пространство.

Анализ влияния спектрального состава освещения на биосинтез эфирного масла у тимьяна выявил статистически значимые различия в зависимости от светового режима. Наибольшее содержание эфирного масла – 0,868 % было зафиксировано при оптимальном соотношении синего и красного света 1 : 1 (вариант 6) (рис. 6). Этот показатель на 19,2 % превышал уровень контрольного варианта (0,728 %). Полученные данные подтверждают гипотезу о необходимости сбалансированного светового сигнала для индукции метаболических путей, ответственных за синтез терпеноидов. Синий свет, как показано в ряде исследований, является ключевым индуктором экспрессии генов, кодирующих ферменты синтеза монотерпенов (например линалоола) [20]. Однако его избыток, вероятно, вызывает стрессовую реакцию, перенаправляющую ресурсы на антиоксидантную защиту, а не на продукцию масла.

Также значительное превышение над контролем показал режим с высокой долей синего света (вариант 4), где содержание масла составило 0,810 %, что на 11,3 % выше контроля. Подобные тенденции были выявлены и при выращивании базилика в исследовании 2023 г. [19].

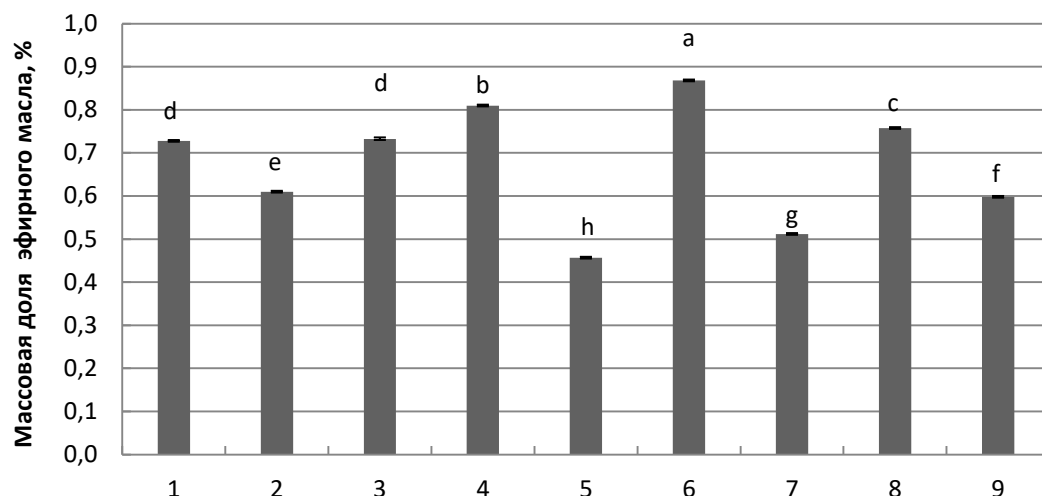


Рис. 6. Влияние спектра освещения на содержание эфирного масла в тимьяне сорта Крымрозовец:

1 – контроль (аналог солнечного спектра); 2 – с добавлением УФ-А компонента; 3 – с добавлением дальнего красного (FR); 4 – высокая доля синего (B); 5 – монохроматический синий (B); 6 – сбалансированный синий-красный (B = R); 7 – монохроматический красный (R); 8 – красный-доминированный (R >> B); 9 – красный-доминированный (R > B)

The effect of the lighting spectrum on the essential oil content in thyme of the Krymrozovets variety:
1 – control (analog of the solar spectrum); 2 – with the addition of UV-A component; 3 – with the addition of far red (FR); 4 – high proportion of blue (B); 5 – monochromatic blue (B); 6 – balanced blue-red (B=R); 7 – monochromatic red (R); 8 – red-dominated (R>>B); 9 – red-dominated (R>B)

Режимы с преобладанием красного света дали неоднозначный результат. Вариант 8 (R : B = 3 : 1) с содержанием масла 0,757 % практически не отличался от контроля, демонстрируя незначительное увеличение на 4,0 % (рис. 6). Однако при сдвиге соотношения в сторону красного света (вариант 9) наблюдалось снижение накопления масла до 0,598 %, что на 17,9 % ниже контроля. Добавление дальнего красного излучения (вариант 3) не оказало значимого влияния на синтез эфирного масла по сравнению с контролем (0,733 %). Наиболее выраженное ингибирующее действие на биосинтез эфирного масла оказали монохроматические режимы и УФ-А спектр. Минимальное содержание 0,456 % – было отмечено при чистом синем свете (вариант 5), что на 37,4 % ниже контрольного значения. Монохроматический красный свет (вариант 7) также существенно подавлял синтез, снижая показатель до 0,512 % (на 29,7 % к контролю). Сильное падение содержания эфирного масла при монохроматическом синем (вариант 5) и красном (вариант 7) освещении указывает на глубокий дисбаланс в метаболизме. Синий свет, особенно в высокой доле, может активировать стрессовые реакции, приводящие к окислительному повреждению терпен-синтаз или к расходованию предшественников на другие защитные соединения [21].

Интересно, что добавление УФ-А компонента к широкому спектру (вариант 2) привело к снижению накопления масла до 0,610 %, что на 16,2 % меньше контроля. Это может быть связано с активацией систем репарации ДНК и синтеза УФ-защитных фенольных соединений в ущерб терпеноидному пути [22].

Таким образом, для максимального накопления эфирного масла у тимьяна наиболее эффективным является оптимальный спектр с равным вкладом синего и красного излучения. Преобладание любого из этих компонентов в монохроматическом режиме, а также добавление УФ-А, приводило к значимому подавлению биосинтетической активности. Контрольный режим, имитирующий солнечный свет, обеспечил средний результат, подтверждая возможность

как стимулирующего, так и ингибирующего воздействия на метаболизм за счет целенаправленной спектральной модуляции.

Заключение. Проведенное исследование доказало, что спектральный состав светодиодного освещения является эффективным агротехнологическим приемом для направленного управления не только зеленой массой, но и накоплением эфирного масла у тимьяна обыкновенного (*Thymus vulgaris* L.) в гидропонных условиях.

Установлена четкая зависимость между спектром света и ростом зеленой массы. Для максимального накопления надземной биомассы (214,4 г) оптимальным является режим с равным соотношением синего и красного света (вариант 6), что обеспечило прирост на 37,1 % относительно контроля. Этот же режим оказался наиболее благоприятным и для биосинтеза эфирного масла, повысив его содержание до 0,868 % (прирост 19,2 %) по сравнению с контролем. Таким образом, комбинированное действие синего и красного излучения оказывало взаимоусиливающий эффект, одновременно активизируя фотосинтетический аппарат и метаболические пути формирования эфирного масла.

Напротив, монохроматические режимы (варианты 5 и 7) вызывали у растений стресс. Это

приводило к сильному снижению роста – масса растений уменьшилась на 37–41 %. Одновременно на 29–37 % сократилось и образование эфирного масла. При этом у растений сформировалась небольшая, компактная форма. Эта особенность делает подобные световые режимы практически полезными для вертикальных ферм, где такие растения можно очень плотно размещать на стеллажах, экономя пространство. Важно отметить, что контрольный режим занял промежуточные позиции по всем изучаемым показателям. Это подтверждает, что классическое «белое» освещение не является оптимальным для решения специфических задач промышленного растениеводства в контролируемой среде.

Полученные данные позволяют создать конкретные рекомендации по освещению для получения тимьяна с заданными свойствами, что крайне важно для современных высокотехнологичных теплиц и вертикальных ферм, производящих лекарственное сырье. Результаты работы имеют практическую ценность для разработки специализированных световых протоколов в высокотехнологичном производстве стандартизированного лекарственного и эфиромасличного сырья с заданными свойствами.

Список источников

1. Маланкина Е.Л., Козловская Л.Н. Химический полиморфизм в семействе Яснотковые – *Lamiaceae* L. В сб.: II Международная научная конференция «Роль метаболомики в совершенствовании биотехнологических средств производства» по направлению «Метаболомика и качество жизни». М., 2019. С. 151–158. EDN: UVFAZI.
2. Маланкина Е.Л., Еремеева Е.Н. Возможные аспекты комплексного изучения представителей рода Тимьян (*Thymus* L.) // Новые и нетрадиционные растения и перспективы их использования. 2016. № 12. С. 37–39. EDN: WEBIEF.
3. Hammoudi D.H., Krayem M., Khaled S., et al. A focused insight into thyme: Biological, chemical, and therapeutic properties of an indigenous Mediterranean herb // *Nutrients*. 2022. Vol. 14, №. 10. Art. 2104. DOI: 10.3390/nu14102104. EDN: EPMMPV.
4. Türkiye İstatistik Kurumu. Доступно по: <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=Tarim-111>. Ссылка активна на 10.11.2025.
5. Анализ рынка пряностей и приправ в Российской Федерации в 2019–2023 гг., прогноз на 2024–2028 гг.: отчет маркетингового исследования. Подготовлен экспертами «РБК Исследования рынков». М., 2022. 120 с.
6. Маланкина Е.Л., Аль Карави Х., Дул В.Н., и др. Варьирование содержания и компонентного состава эфирного масла в сырье тимьяна обыкновенного (*Thymus vulgaris* L.) в зависимости от сорта и происхождения // Вопросы обеспечения качества лекарственных средств. 2018. № 2. С. 27–33. EDN: USPPWO.

7. Chen Z., Li X., Zhang L. The effect of light quality on plant physiology, flavonoid and essential oil content in hydroponically grown plants: A review // *Industrial Crops and Products*. 2019. Vol. 141. Art. 111752. DOI: 10.1016/j.indcrop.2019.111752. EDN: PEAFFN.
8. Титенков А.В., Князева И.В., Вершинина О.В., и др. Оценка влияния биопрепаратов и светодиодного облучения на растения тимьяна обыкновенного в закрытых агроэкосистемах // *Вестник КрасГАУ*. 2024. № 9. С. 26–35. DOI: 10.36718/1819-4036-2024-9-26-25. EDN: ZGLLSW.
9. Dou H., Niu G., Gu M., et al. Effects of light quality on growth and phytonutrient accumulation of herbs under controlled environments // *Horticulturae*. 2017. Vol. 3, N 2. Art. 36. DOI: 10.3390/horticulturae3020036.
10. Титенков А.В. Спектральный состав освещения как фактор повышения продуктивности тимьяна при выращивании в гидропонных установках. В сб.: XXIX Международная научно-производственная конференция «Вызовы и инновационные решения в аграрной науке». Майский, 21–22 мая 2025 года. Майский: Белгородский ГАУ. 2025. С. 101. EDN: SYHNSW.
11. Маланкина Е.Л., Ткачева Е.Н., Аль Карави Х., и др. Варьирование биохимических показателей сырья тимьяна ползучего (*Thymus serpyllum* L.) в зависимости от сорта // *Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии*. 2018. Т. 21, № 7. С. 11–15. DOI: 10.29296/25877313-2018-07-03. EDN: XUZFBR.
12. Batista D.S., Felipe S.H.S., Silva T.D., et al. Light quality in plant tissue culture: does it matter? // *In Vitro Cellular & Developmental Biology. Plant*. 2018. Vol. 54, N 3. P. 195–215. DOI: 10.1007/s11627-018-9902-5. EDN: YJAOGD.
13. Chatterjee D., Mitra A. Unlocking the potential of spectral LED lights in enhancing glandular trichome density and accumulation of bioactive specialized metabolites in spearmint // *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2025. Art. 113239. DOI: 10.1016/j.jphotobiol.2025.113239.
14. Каталог селекционных достижений. Доступно по: <https://gossortrf.ru/registry/gosudarstvennyy-reestr-selektionnykh-dostizheniy-dopushchennykh-k-ispolzovaniyu-tom-1-sorta-rasteniy-krymrozovets-timyan>. Ссылка активна на 10.11.2025.
15. Soulimani R., Joshi R.K. Toxicological aspects and pharmaco-therapeutic properties of linalool, a natural terpene derivative of essential oils: Literature studies // *Am J Essent Oils Nat Prod*. 2020. N 8. P. 24–34.
16. Государственная фармакопея РФ. М. 2018. XIV изд. Т. II. ОФС. 1.5.3.0010.15. С. 2383–2387; Т. IV. ФС. 2.5.0029.15. С. 6284–6292.
17. Meng Q., & Runkle E.S. Far-red radiation interacts with relative and absolute blue and red photon flux densities to regulate growth, morphology, and pigmentation of lettuce and basil seedlings // *Scientia Horticulturae*. 2019. Vol. 255. P. 269–280. DOI: 10.1016/j.scienta.2019.05.030.
18. Skorokhodova A.N., Anisimov A.A., Yakovleva O.S., et al. The influence of the spectral composition of light on the morphophysiological characteristics of red-leaved basil in hydroponic culture. In: VI International Conference on Actual Problems of the Energy Complex and Environmental Protection (APEC-VI-2023). Karshi. 14–16 июня 2023 года. Vol. 411. Les Ulis: EDP SCIENCES S A. 2023. P. 01055. DOI: 10.1051/e3sconf/202341101055. EDN: ZSTTFP.
19. Вершинина О.В., Князева И.В. Технологические приемы выращивания кориандра на вертикальных стеллажах // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2022. № 2. С. 100–106. DOI: 10.18286/1816-4501-2022-2-100-106. EDN: IDTTLA.
20. Li W., Zhang J., Sun J., et al. Light irradiation with different wavelenghts modifies the quality traits and monoterpenes biosynthesis of postharvest grape berries during the shelf life // *Lwt*. 2023. Vol. 185. P. 115164. DOI: 10.1016/j.lwt.2023.115164 EDN: XYPEXW.
21. Tsiaparas S. Influence of red-and blue-dominant light spectra on the biosynthesis of mono-and sesquiterpenes in mint (*Mentha x piperita*) essential oil // *Food Chemistry*. 2025. P. 146731. DOI: 10.1016/j.foodchem.2025.146731.
22. Hideg É., Jansen M.A.K., Strid Å. UV-B exposure, ROS, and stress: inseparable companions or loosely linked associates? // *Trends in Plant Science*. 2013. Vol. 18, N 2. P. 107–115. DOI: 10.1016/j.tplants.2012.09.003. EDN: RIQKML.

References

1. Malankina EL, Kozlovskaya LN. Chemical polymorphism in the family *Lamiaceae* L. In: *International Scientific Conference "The role of metabolomics in the development of biotechnological media": collection of articles on "Metabolomics and quality of life"*. Moscow; 2019. P. 151–158. (In Russ.). EDN: UVFAZI.
2. Malankina EL, Ereemeeva EN. Possible aspects of comprehensive training of a representative of the genus Thyme (*Thymus* L.). *Novye i netradicionnye rasteniya i perspektivy ix ispol'zovaniya*. 2016;12:37-39. (In Russ.). EDN: WEBIEF.
3. Hammoudi DH, Krayem M, Khaled S., et al. A focused insight into thyme: Biological, chemical, and therapeutic properties of an indigenous Mediterranean herb. *Nutrients*. 2022;14(10):2104. DOI: 10.3390/nu14102104.
4. *Türkiye İstatistik Kurumu*. Available at: <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=Tarim-111>. Accessed: 10.11.2025.
5. *Analiz ry'nka pryanostry i priprav v Rossijskoj Federacii v 2019–2023 gg., prognoz na 2024–2028 gg.: otchet marketingovogo issledovaniya. Podgotovlen e`kspertami RBK Issledovaniya ry`nkov*. Moscow; 2022. 120 p. (In Russ.).
6. Malankina EL, Al Karavi H, Dul VN, et al. The variation of quantitative content and component composition of essential oil in raw materials of common thyme (*Thymus vulgaris* L.) depending on cultivar and origin. *Journal of Pharmaceuticals quality assurance issue*. 2018;2:27-33. (In Russ.). EDN: USPPWO.
7. Chen Z, Li X, Zhang L. The effect of light quality on plant physiology, flavonoid and essential oil content in hydroponically grown plants: A review. *Industrial Crops and Products*. 2019;141:111752. DOI: 10.1016/j.indcrop.2019.111752. EDN: PEAFFN.
8. Titenkov AV, Knyazeva IV, Vershinina OV, et al. Assessment of the effects of biologics and LED irradiation on thyme plants in closed agroecosystems. *Bulletin of KSAU*. 2024;9:26-35. DOI: 10.36718/1819-4036-2024-9-26-25. EDN: ZGLLSW.
9. Dou H, Niu G, Gu M, et al. Effects of light quality on growth and phytonutrient accumulation of herbs under controlled environments. *Horticulturae*. 2017;3(2);36. DOI: 10.3390/horticulturae3020036.
10. Titenkov AV. Spectral composition of cultivation as a factor in increasing thyme productivity when grown in hydroponic plants. In: *XXIX Mezhdunarodnaya nauchno-proizvodstvennaya konferenciya "Vyzovy i innovacionnye resheniya v agrarnoj nauke". Mayskij. 21–22 May 2025*. Maisky: Belgorod State University; 2025. P. 101. (In Russ.). EDN: SYHNSW.
11. Malankina EL, Tkacheva EN, Al Karavi H, et al. A variety of biochemical developers of creeping thyme cheese (*Thymus serpyllum* L.) depending on the variety. *Problems of biological, medical and pharmaceutical chemistry*. 2018;21(7):11-15.
12. Batista DS, Felipe SHS, Silva TD., et al. Light quality in plant tissue culture: does it matter? *In Vitro Cellular & Developmental Biology. Plant*. 2018; 54:195-215. DOI: 10.1007/s11627-018-9902-5.
13. Chatterjee D, Mitra A. Unlocking the potential of spectral LED lights in enhancing glandular trichome density and accumulation of bioactive specialized metabolites in spearmint. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2025;113239. DOI: 10.1016/j.jphotobiol.2025.113239.
14. Katalog selekcionnykh dostizhenij. Available at: <https://gossortrf.ru/registry/gosudarstvennyy-reestr-selektionnykh-dostizheniy-dopushchennykh-k-ispolzovaniyu-tom-1-sorta-rasteni/krymrozovets-timyan>. Accessed: 11.10.2025. (In Russ.).
15. Soulimani R, Joshi RK. Toxicological aspects and pharmaco-therapeutic properties of linalool, a natural terpene derivative of essential oils: Literature studies. *Am J Essent Oils Nat Prod*. 2020;8:24-34.
16. *The State Pharmacopoeia of the Russian Federation*. Moscow. 2018. XIV ed. Vol. II. OFS. 1.5.3.0010.15. P. 2383–2387; Vol. IV. FS. 2.5.0029.15. P. 6284–6292.
17. Meng Q, Runkle ES. Far-red radiation interacts with relative and absolute blue and red photon flux densities to regulate growth, morphology, and pigmentation of lettuce and basil seedlings. *Scientia Horticulturae*. 2019;255:269-280. DOI: 10.1016/j.scienta.2019.05.030.
18. Skorokhodova AN, Anisimov AA, Yakovleva OS, et al. The influence of the spectral composition of light on the morphophysiological characteristics of red-leaved basil in hydroponic culture. In: *VI Inter-*

- national Conference on Actual Problems of the Energy Complex and Environmental Protection (APEC-VI-2023)*. Karshi. 14–16 Jun 2023. Vol. 411. Les Ulis: EDP SCIENCES S A. 2023. P. 01055. (In Russ.). DOI: 10.1051/e3sconf/202341101055. EDN: ZSTTFP.
19. Vershinina OV, Knyazeva IV. Technological methods of growing coriander on vertical racks. *Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2022;2:100-106. DOI: 10.18286/1816-4501-2022-2-100-106. EDN: IDTTLA.
20. Li W, Zhang J, Sun J, et al. Light irradiation with different wavelmengths modifies the quality traits and monoterpenes biosynthesis of postharvest grape berries during the shelf life. *Lwt*. 2023;185:115164. DOI: 10.1016/j.lwt.2023.115164.
21. Tsiaparas S. Influence of red-and blue-dominant light spectra on the biosynthesis of mono-and sesquiterpenes in mint (*Mentha × piperita*) essential oil. *Food Chemistry*. 2025:146731. DOI: 10.1016/j.foodchem.2025.146731.
22. Hideg É, Jansen MA. UV-B exposure, ROS, and stress: inseparable companions or loosely linked associates? *Trends in Plant Science*. 2013;18(2):107-115. DOI: 10.1016/j.tplants.2012.09.003. EDN: RIQKML.

Статья принята к публикации 20.01.2026 / The article accepted for publication 20.01.2026

Информация об авторах:

Андрей Владимирович Титенков, младший научный сотрудник лаборатории исследований технологических свойств сельскохозяйственных материалов, аспирант

Инна Валерьевна Князева, старший научный сотрудник лаборатории исследований технологических свойств сельскохозяйственных материалов, кандидат биологических наук

Information about the authors:

Andrey Vladimirovich Titenkov, Junior Researcher, Laboratory for Research on Technological Properties of Agricultural Materials, Postgraduate student

Inna Valeryevna Knyazeva, Senior Researcher, Laboratory for Research on Technological Properties of Agricultural Materials, Candidate of Biological Sciences

