

Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.18619/2072-9146-2026-1-13-21
 УДК: 635.64:631.526.321:628.9

И.В. Князева¹, Е.В. Журавлева¹,
 Е.А. Домблидес², Я.П. Тукусер²

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ) 109428, Россия, Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5

²Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр овощеводства» (ФГБНУ ФНЦО) 143072, Россия, Московская область, Одинцовский район, п. ВНИИССОК, ул. Селекционная, д. 14

*Автор для переписки:
 knyazewa.inna@yandex.ru

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

Вклад авторов: И.В. Князева: проведение исследования, методология, создание черновой рукописи. Е.В. Журавлева: концептуализация. Е.А. Домблидес: создание рукописи и ее редактирование. Я.П. Тукусер: проведение исследования, ресурсы.

Конфликт интересов. Е.В. Журавлева является членом редакционной коллегии журнала «Овощи России» с 2017 года, но не имеет никакого отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятие в журнале процедуры рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляют.

Для цитирования: Князева И.В., Журавлева Е.В., Домблидес Е.А., Тукусер Я.П. Влияние спектра светодиодного освещения на адаптацию микроклонов томата к условиям *ex vitro*. *Овощи России*. 2026;(1):13-21.
 https://doi.org/10.18619/2072-9146-2026-1-13-21

Поступила в редакцию: 29.10.2025
Принята к печати: 26.12.2025
Опубликована: 16.03.2026

Inna V. Knyazeva^{1*}, Ekaterina V. Zhuravleva¹,
 Elena A. Dombldes², Yana P. Tukuser²

¹Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Scientific Agroengineering Center VIM» (FSAC VIM) 5, 1st Institutskiy proezd, Moscow, Russia, 109428

²Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Scientific Vegetable Center» (FSBSI FSVC) 14, Selektsionnaya, Odintsovo district, Moscow region, Russia, 143072

*Corresponding Author:
 knyazewa.inna@yandex.ru

Funding. The study was conducted under the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation FGUN-2025-0008.

Authors' Contribution: I.V. Knyazeva: investigation, methodology, writing – original draft. E.V. Zhuravleva: conceptualization. E.A. Dombldes: writing – review & editing. Ya.P. Tukuser: investigation, resources.

Conflict of interest. E.V. Zhuravleva has been a member of the editorial board of the Journal "Vegetable crops of Russia" since 2017, but had nothing to do with the decision to publish this manuscript. The manuscript passed the journal's peer review procedure. The authors declare no other conflicts of interest.

For citations: Knyazeva I.V., Zhuravleva E.V., Dombldes E.A., Tukuser Ya.P. The influence of LED lighting spectrum on the adaptation of tomato microclones to *ex vitro* conditions. *Vegetable crops of Russia*. 2026;(1):13-21. (In Russ.)
 https://doi.org/10.18619/2072-9146-2026-1-13-21

Received: 29.10.2025
Accepted for publication: 26.12.2025
Published: 16.03.2026

Влияние спектра светодиодного освещения на адаптацию микроклонов томата к условиям *ex vitro*



РЕЗЮМЕ

Актуальность. Необходимо разработать эффективные методы адаптации микро растений *ex vitro*, позволяющих повысить их устойчивость к неблагоприятным факторам внешней среды и обеспечить высокий выход качественного посадочного материала. Современные биотехнологии, основанные на использовании специализированных климатических камер и освещения различного спектрального состава, предоставляют уникальные возможности для оптимизации процесса адаптации, что крайне актуально в условиях современного сельского хозяйства, ориентированного на ресурсосбережение и экологичность.

Материалы и методы. Адаптацию томата двух сортов Гном и Челнок из коллекции лаборатории селекции и семеноводства пасленовых культур ФГБНУ ФНЦО осуществляли по традиционной технологии и в камере с автоматическим управлением климатическими параметрами производства ВИМ (Россия) к условиям *ex vitro*. Освещение характеризовалось спектром излучения 16B:42G:39R:3FR ммоль/м²·с (контроль) и 15B:1G:84R:0FR ммоль/м²·с. Общая плотность фотонного потока (ПФП) для обоих вариантов равнялась 140 ммоль/м²·с.

Результаты. С помощью климатических камер, оснащенных специализированными источниками света, удалось добиться значительных преимуществ в развитии растений по сравнению с традиционной технологией. В частности, светодиодное освещение СИД-W (16B:42G:39R:3FR) обеспечило максимальную длину побегов (20,3 см), тогда как СИД-RB (15B:1G:84R:0FR) способствовало наилучшему накоплению фотосинтетических пигментов (хлорофилл *a* – 1,3 мг/г, хлорофилл *b* – 0,56 мг/г, сумма *a+b* – 1,86 мг/г). При этом содержание каротиноидов выросло до 0,34-0,38 мг/г в климатических камерах, в то время как традиционная технология привела к минимальной концентрации (0,20-0,21 мг/г).

Заключение. Проведенные исследования подтвердили положительное влияние климатической камеры и специализированного светодиодного освещения на рост и развитие микро растений томата. Оптимизация спектрального состава повысила длину побегов, увеличило число листьев и улучшило накопление фотосинтетических пигментов. Наблюдалось также различие в реакции сортов на разные спектры освещения, что подчеркивает необходимость специализированного подхода к каждому сорту. Перспективы дальнейших работ связаны с совершенствованием технологий адаптации и разработкой оптимальных спектральных режимов для повышения продуктивности томата.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

томат, адаптация *ex vitro*, светодиодное освещение, климатическая камера, пигменты, вегетационные индексы

The influence of LED lighting spectrum on the adaptation of tomato microclones to *ex vitro* conditions

ABSTRACT

Relevance. It is necessary to develop effective methods for the adaptation of micro plants *ex vitro*, which will increase their resistance to unfavorable environmental factors and ensure a high yield of high-quality planting material. Modern biotechnologies based on the use of specialized climate chambers and varying spectral compositions of lighting offer unique opportunities for optimizing the adaptation process, which is extremely important in modern agriculture, which is focused on resource conservation and environmental friendliness.

Materials and Methods. Tomato varieties Gnome and Chelnok from the collection of the Solanaceae Breeding and Seed Production Laboratory of the Federal Scientific Center of Oncology were adapted to *ex vitro* conditions using traditional technology and a chamber with automatic climate control manufactured by VIM (Russia). The illumination had a radiance spectrum of 16B:42G:39R:3FR mmol/m² s (control) and 15B:1G:84R:0FR mmol/m² s. The total photon flux density (TPD) for both treatments was 140 mmol/m² s.

Results. Using climate chambers equipped with specialized light sources, we achieved significant advantages in plant development compared to traditional technology. Specifically, CID-W (16B:42G:39R:3FR) LED lighting resulted in maximum shoot length (20.3 cm), while CID-RB (15B:1G:84R:0FR) promoted the best accumulation of photosynthetic pigments (chlorophyll *a* – 1.3 mg/g, chlorophyll *b* – 0.56 mg/g, sum of *a+b* – 1.86 mg/g). Furthermore, carotenoid content increased to 0.34-0.38 mg/g in the climate chambers, while traditional technology resulted in minimal concentrations (0.20-0.21 mg/g).

Conclusion. The studies confirmed the positive impact of a climate chamber and specialized LED lighting on the growth and development of tomato microplants. Optimizing the spectral composition increased shoot length, leaf count, and the accumulation of photosynthetic pigments. Varieties also responded differently to different lighting types, highlighting the need for a personalized approach for each variety. Future research focuses on improving adaptation technologies and developing optimal spectral regimes to enhance tomato productivity.

KEYWORDS:

Solanum lycopersicum L., *ex vitro* adaptation, LED lighting, climate chamber, pigments, vegetation indices

Введение

Томат (*Solanum lycopersicum* L.) – экономически важная культура, занимающее ведущее место среди овощных культур благодаря высокой пищевой ценности и универсальности использования [1].

Условия окружающей среды для роста микроклонов *ex vitro* сильно отличаются от условий, используемых для культивирования *in vitro*. Метод клонального микро-размножения *in vitro* является одним из ключевых факторов получения здоровых растений до их пересадки в условия *ex vitro* [2].

Биотехнология приносит значительную пользу в достижении главного прогресса в производстве и поставках продуктов питания [3]. Биотехнологические методы позволяют за короткий период получить оздоровленный материал для дальнейшего включения в программу селекционных скрещиваний. Культура клеток является мощнейшим инструментом для увеличения коэффициента размножения и получения оздоровленного материала сельскохозяйственных культур [4]. Культивирование клеток, тканей или органов растений *in vitro* на среде, содержащей селективные агенты, дает возможность отбирать и регенерировать растения с желаемыми характеристиками. Этот метод также эффективно использовался для индуцирования толерантности, что включает использование некоторых селективных агентов, которые обеспечивают преимущественное выживание и рост желаемых фенотипов. Селекция *in vitro* может значительно сократить время для отбора желаемых признаков при минимальном взаимодействии с окружающей средой, а также может дополнять селекцию в полевых условиях [5]. Переход микро-растений из лабораторных условий *in vitro* к естественным условиям *ex vitro* считается наиболее трудным этапом клонального микро-размножения. На способность растений адаптироваться оказывают влияние многочисленные факторы: влажность, и температура воздуха и грунта, фотопериод, интенсивность и спектр освещения, а также индивидуальные генетические характеристики разных видов и сортов [6].

Растения томата рассматривают как модельный объект для двудольных культур и используют для исследований функциональности генов, которые могут быть применены к другим культурам [7]. Томат является одним из основных овощей, к которому были успешно применены методы клонального микро-размножения *in vitro* и генетические эксперименты для улучшения качества плодов. Размножение томата *in vitro* удалось осуществить благодаря использованию семян и вегетативных частей растения в качестве эксплантов [8]. Культура томата *in vitro* успешно используется для селекции толерантных сортов. Экспериментально установлено, что коэффициент регенерации томата *in vitro* зависит от генотипа, экспланта и регуляторов роста, используемых в культуральной среде

[9]. Изучение регуляции развития листьев томата служит основой для селекции высокопродуктивных сортов с повышенной фотосинтетической эффективностью [10], что физиологически детерминировано максимальным поглощением света в диапазонах 400-510 нм и 560-710 нм [11]. Фотосинтетические пигменты, определяя окраску растений и обеспечивая первичные реакции фотосинтеза, отвечают за восприятие и преобразование световой энергии, что напрямую влияет на продуктивность [12]. Каротиноиды дополняют поглощение света хлорофиллом и выполняют защитную функцию, нейтрализуя избыток энергии и предотвращая фотоповреждения [13].

Количество, качество и направление освещения имеют первостепенное значение для выживания фото-автотрофных организмов. Световые сигналы из широкого диапазона спектра (280-750 нм) воспринимаются несколькими фоторецепторами, относящимися к трем основным семействам: фитохромам, криптохромам и фототропинам [14]. Восприятие световых сигналов обеспечивает растениям возможность точной настройки процессов развития в рамках сложного явления фотоморфогенеза, включая условия культивирования *in vitro* и *ex vitro* [15]. Спектральный состав освещения, уровень облучения с точки зрения плотности потока фотонов (ПФП) и фотопериода оказывали значительное влияние на морфогенез и рост растений. В исследованиях Gupta и Jatothu [16] установлено, что различные морфологические, анатомические и физиологические признаки, такие как длина побегов, образование пазушных побегов, индукция соматического эмбриогенеза, ризогенез, анатомия листьев и фотосинтетические способности растений, выращенных *in vitro*, регулируются спектральными характеристиками светодиодов.

Развитие инновационных технологий светодиодного освещения инициирует проведение исследований, нацеленных на создание эффективных схем освещения, обеспечивающих увеличение объемов растительной биомассы, усиление синтеза необходимых соединений и расширение возможностей биотехнологий [17, 18]. Синие и красные светодиоды в основном используют для выращивания растений, так как их спектральное распределение мощности оптимально для фотосинтеза [19]. Световые режимы способствуют значительному повышению адаптивных способностей растений в условиях контролируемого выращивания (*in vitro*) и существенно улучшают их сопротивляемость стрессовому воздействию внешней среды при переводе в условия (*ex vitro*) [20]. Светодиодное освещение оказывало благоприятное воздействие на развитие корневой системы, удлинение побегов, активность антиоксидантной защиты и уровень содержания хлорофилла у микро-растений томата и малины в период адаптации в условиях *ex vitro* [21, 22, 23].

Целью наших исследований было изучение возмож-

ности повышения устойчивости микрорастений томата на основе использования спектров светодиодного освещения на этапе адаптации к условиям *ex vitro*.

Условия, материалы и методы

Исследования проводили в 2023-2024 годах в Федеральном научном агроинженерном центре ВИМ (ФНАЦ ВИМ). Растительный материал сортов томата предоставлен из биоресурсной коллекции лаборатории селекции и семеноводства пасленовых культур ФГБНУ ФНЦО. Для контролируемых условий закрытых агроэкосистем важно выбирать сорта с определенными характеристиками: компактностью размеров (до 40-50 см высоты), коротким периодом созревания плодов (82-110 суток) и детерминантным типом роста, что характерно для сортов Гном и Челнок. Помимо этих факторов, большое значение имеет наличие хороших вкусовых качеств урожая, что повышает пищевую ценность

продукции и увеличивает потребительские предпочтения при использовании в искусственно созданных агроэкосистемах. Однако каждый из сортов обладает уникальными особенностями: сорт Гном характеризуется высокой завязываемостью плодов, повышенной устойчивостью к болезням и стрессовым факторам, тогда как Челнок выделяется более высоким уровнем концентрации питательных веществ и витаминов в плодах, что определяет выбор конкретного сорта в зависимости от целей и особенностей конкретной агроэкосистемы.

Для получения экплантов в культуре *in vitro* использовали семенной материал. Обеззараженные семена помещали в стерильные стеклянные емкости (100 мл), закрытые пластиковыми крышками Magenta™ В-сар для их дальнейшего прорастания. В качестве индукции побего- и корнеообразования использовали безгормональную агаризованную (7 г/л) питательную среду Murashige-Skoog (MS) с концентрацией сахарозы 2%.



A



Б



В

Рис. 1. Адаптация к условиям *ex vitro* микрорастений томата сортов Гном и Челнок:

А – общий вид климатической камеры;
Б – микрорастения перед адаптацией;
В – адаптированные растения томата

Fig. 1. Adaptation of tomato microplants of the Gnom and Chelnok varieties to *ex vitro* conditions:

A – general view of the climate chamber;
B – microplants before adaptation;
C – adapted tomato plants

Полученные после укоренения *in vitro* на 10 сутки микрорастения двух исследуемых сортов томата достигали длины 4,3-5,1 см и обладали четырьмя настоящими листьями, что свидетельствовало о готовности к следующему этапу адаптации *ex vitro* [24].

Перед этапом адаптации микрорастения извлекали из стеклянных колб, корневую систему промывали дистиллированной водой, а затем кратковременно (5 с) погружали в 0,01% раствор марганцовки (KMnO₄). После обработки растения пересаживали в емкости объемом 0,3 л, содержащие смесь нейтрализованного торфа «Агробалт-Н» фракции 0-20 мм и агроперлита фракции 0,1-1,0 мм в пропорции 1:3. Торф подвергался предварительной стерилизации в сушильном шкафу марки «Экрос ПЭ-4630М» (Россия), при температуре 120°C на протяжении 2 часов.

Адаптация растений по традиционной технологии.

Адаптацию растений томата по традиционной технологии (ТТ) осуществляли в фитокомнате на стеллажах. Общее время адаптации составило 25 суток. Микрорастения были высажены в контейнеры, предварительно подготовленные в соответствии с условиями адаптации, указанными выше. Для сохранения влажности субстрата горшок накрывали пищевой пленкой в один слой. Дальнейшее развитие растений проходило в фитокомнате при температуре 22±2°C и фотопериоде 16 ч. В качестве основного источника освещения использовали светодиодные лампы, характеристики которых приведены в таблице 1. По мере роста растений и образования новых листьев в пищевой плёнке проделывали небольшие вентиляционные отверстия. Спустя 20 суток полностью раскрывали укрытие, оставляя растения на дополнительное время адаптации в условиях фитокомнаты.

Адаптация растений в климатической камере с системой светодиодного освещения. Адаптацию микрорастений сортов томата проводили в течение 14 суток в климатической камере (КК), разработанной Федеральным научным агроинженерным центром ВИМ (рис. 1 А-В). Объем камеры составил 0,98 м³, поддерживаемая температура составила +22±2°C, начальная

влажность воздуха – 96%±2. За весь адаптационный период влажность постепенно снижалась примерно на 3,3% в сутки, доходя до конечного значения 50%±2 к концу эксперимента. Для полива растений использовали систему капельного орошения. Полив проводили один раз в сутки, продолжительностью 30 с на одно растение. Объем воды для полива одного растения составлял 25 мл.

Система освещения состояла из комбинированных облучателей на основе светодиодов с различным спектральным составом (табл. 1). Было использовано два варианта освещения: 1. белый спектр (контроль); 2. сочетание красного и синего спектра (R/B). Период использования света составлял 16 часов.

Измерения плотности потока фотонов и спектрального состава излучения проводили с помощью прибора MK350D Compact Spectrometer (UPRtek Corp. Miaoli County, Taiwan). Спектральный анализ отражающей способности листьев томата измеряли портативным прибором PolyPen RP410 UVIS (Чехия).

Длину побегов всех растений каждого сорта измеряли с применением технической линейки, точность измерений составляла 0,1 см. Дополнительно фиксировали число сформировавшихся листьев. Измерения проводили дважды: перед началом эксперимента (до размещения растений в камере и закрытия пленкой) и после завершения этапа адаптации (на 14-е и 25-е сутки). На этапе адаптации растений-регенерантов учитывали следующие показатели: длину побега (см), количество листьев (шт.), накопление основных фотосинтетических пигментов (мг/г) и показатель вегетационного индекса (NDVI). Для оценки адаптивности использовали два варианта шести растений из каждого сорта.

Содержание хлорофилла а (Хл. а), хлорофилла b (Хл. b) и каротиноидов (Кар.) определяли спектрофотометрическим методом в ацетоне при длинах волн 662 нм, 644 нм и 440,5 нм соответственно. Для измерений использовали UV-2200 с двойной УФ-видимой областью (UV/VIS) (Китай). Концентрация пигментов вычислялась по следующим формулам (1)-(4) [25].

Таблица 1. Среднее значение ПФП, поступающее от светодиодов в каждой из зон спектра: синей (400-500 нм), зеленой (500-600 нм) и красной (600-700 нм)
Table 1. Average value of the PFP coming from LEDs in each of the spectrum zones: blue (400-500 nm), green (500-600 nm) and red (600-700 nm)

№	Вариант освещения	Поток фотонов, мкмоль м ⁻² с ⁻¹					
		ПФП λ= 400-800 нм	Синий (B)	Зеленый (G)	Красный (R)	Дальний красный (FR)	Процентный состав света (B:G:R:FR)
1	СИД – W белый (контроль)	140,3±3,3	22,8±1,3	58,7±3,2	54,1±2,0	4,7±1,6	16:42:39:3
2	СИД – RB	140,2±3,3	20,5±1,3	1,1±0,3	118,2±2,0	0,03±0,01	15:1:84:0

$$Хл.а = 9,784_{D662} - 0,990_{D644} \quad (1)$$

$$Хл.б = 21,426_{D644} - 4,650_{D662} \quad (2)$$

$$Хл.(а+б) = 5,134_{D662} + 20,436_{D644} \quad (3)$$

$$Кар. = 4,695_{D440,5} - 0,268_{Хл. а + б} \quad (4)$$

Содержание пигментов в образце растения рассчитывалось по следующей формуле (5) [26]:

$$X = \frac{C \cdot V}{a \cdot 1000} \quad (5)$$

где X – содержание пигмента в образце растения, мг/г;

C – концентрация пигментов в мг/л;

V – объем экстракта, мл;

a – масса навески, г.

Статистическую обработку результатов проводили с применением дисперсионного анализа (ANOVA) в программе MS Excel. В качестве *post hoc* теста использовали тест Дункана.

Результаты и обсуждение

Процент приживаемости микрорастений томата сортов Гном и Челнок на этапе адаптации *ex vitro* достигал 100%, независимо от применения традиционной технологии либо с использованием климатической камеры. Оптимизация условий способна увеличить показатель успешной адаптации до значений 90-100%. Согласно исследованию Sarshayeva et al., различный спектральный состав освещения избирательно влиял на процессы роста и развития микрорастений земляники [27].

При сравнении двух вариантов светодиодного освещения были выявлены существенные различия в пока-

зателе длины побегов у микрорастений сортов Гном и Челнок в климатической камере по сравнению с традиционной технологией (рис. 3). Наилучшие результаты были получены при обработке СИД – W (16В:42G:39R:3FR ммоль/м²с), где длина побегов у обоих сортов составила в среднем 20,3 см, что было значительно выше на 89,7%, чем в контроле (ТТ) 10,7 см. Обработка СИД – RB (15В:1G:84R:0FR ммоль/м²) с преобладанием доли красного спектра продемонстрировала меньший прирост длины побега у сортов Гном и Челнок по сравнению с контролем СИД – W в климатической камере. Длина побегов у микрорастений томата, адаптированных в климатической камере при обоих вариантах освещения, оказалась значительно больше по сравнению с растениями, адаптированных традиционным способом.

В листьях томата сортов Гном и Челнок в климатической камере (КК) была самая высокая концентрация, фотосинтетических пигментов, в то время как в листьях микрорастений адаптированных по традиционной технологии (ТТ) было зафиксировано наименьшее количество фотосинтетических пигментов (таб. 2). Максимальные значения содержания хлорофилла а (в среднем 1,3 мг/г), хлорофилла b (0,56 мг/г) и общей концентрации хлорофиллов (а+б) (1,86 мг/г) были зафиксированы у микрорастений томата сортов Гном и Челнок при варианте светодиодного освещения СИД-RB, характеризующимся доминированием красного участка спектра.

Минимальный уровень каротиноидов отмечали в контрольных группах (варианты ТТ), составив для сорта Гном 0,20 мг/г и для сорта Челнок – 0,21 мг/г. Применение освещения белыми светодиодами (LED-W) в условиях климатических камер обеспечило максимальное увеличение показателей каротиноидов, повы-

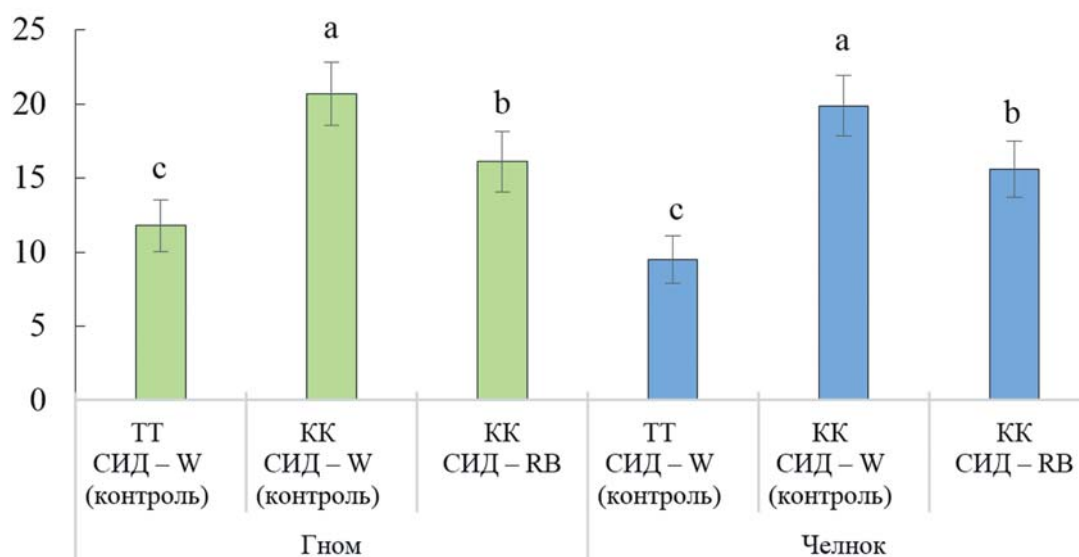


Рис 2. Изменение длины побегов микрорастений томата сортов Гном и Челнок, см. Разные буквы в столбцах указывают на статистически значимые различия ($P \leq 0,05$)
 Fig. 2. Change in the length of shoots of tomato microplants of the Gnom and Chelnok varieties, cm. Different letters in the columns indicate statistically significant differences ($P \leq 0,05$)

Таблица 2. Содержание фотосинтетических пигментов биомассы томата сортов Гном и Челнок по завершению периода адаптации *ex vitro*
 Table 2. The content of photosynthetic pigments in the biomass of tomato varieties Gnom and Chelnok at the end of the *ex vitro* adaptation period

Сорт	Вариант опыта		Количество фотосинтезирующих пигментов, мг/г			
			С хл.а	С хл.б	С хл.(а+б)	С кар.
Гном	ТТ (контроль)	СИД – W (контроль)	0,73±0,05с*	0,35±0,01с	1,08±0,06с	0,20±0,01b
		СИД – W (контроль)	0,96±0,04b	0,37±0,02b	1,33±0,09b	0,22±0,01b
	КК	СИД – RB	1,33±0,10a	0,58±0,03a	1,91±0,12a	0,34±0,01a
Челнок	ТТ (контроль)	СИД – W (контроль)	0,78±0,04с	0,33±0,02с	1,11±0,06с	0,21±0,01с
		СИД – W (контроль)	0,97±0,05b	0,39±0,02b	1,36±0,07b	0,38±0,02a
	КК	СИД – RB	1,29±0,08a	0,52±0,03a	1,81±0,11a	0,31±0,01b

*тест Дункана рассчитывался по каждому сорту отдельно

сив их до 0,38 мг/г у сорта Челнок. Активация красного компонента спектра (LED-RB) оказала значительное влияние на метаболические процессы растений. У сорта Гном зарегистрировано статистически значимое повышение концентрации каротиноидов до 0,34 мг/г, что интерпретируется как адаптационная реакция фотосинтетического аппарата на усиление интенсивности красного спек-

тра. Напротив, у сорта Челнок дополнительный красный спектр вызвал уменьшение их концентрации до 0,31 мг/г. Эта динамика иллюстрирует генетически обусловленную неоднородность в способности растений регулировать баланс каротиноидных комплексов в зависимости от спектра освещения. Экспериментальное выращивание микро-растений смородины красной в условиях адаптационной

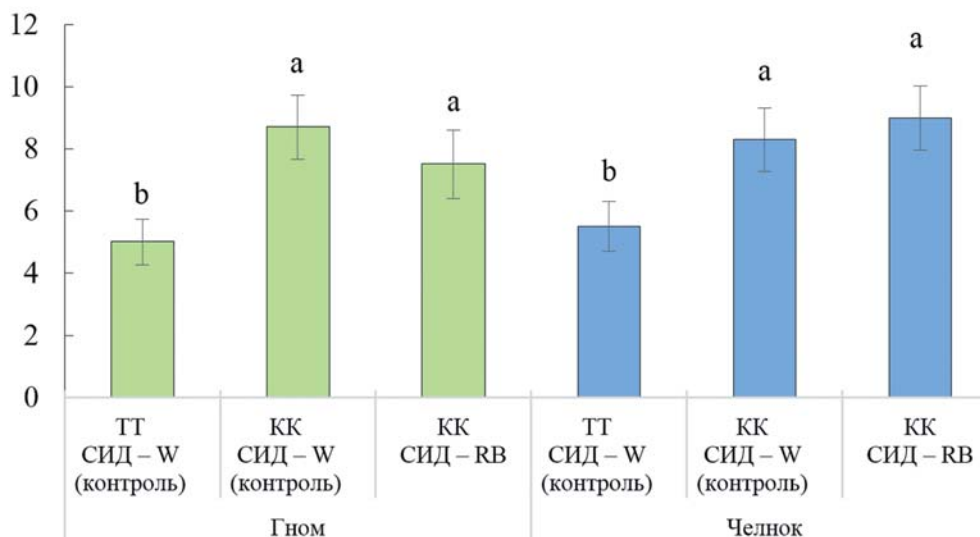


Рис. 3. Изменение количества листьев у микрорастений томата сортов Гном и Челнок, шт. Разные буквы в столбцах указывают на статистически значимые различия ($P \leq 0,05$)
 Fig. 3. The number of leaves per microclone of tomatoes of the cv. Gnom and Chelnok variety during the adaptation period, pcs. Different letters in the columns indicate statistically significant differences ($P < 0.05$)

камеры (ФНАЦ ВИМ) с применением различных спектров освещения и длин волн оказало значительное влияние на их ростовые характеристики. Было выявлено, что тип применяемого светодиодного освещения существенно определяет содержание хлорофилла и каротиноидов у всех изученных сортов. Показано, что содержание хлорофилла *b* стабильно превышало остальные варианты при освещении белым спектром (W). В то же время отношение хлорофилла *a* к хлорофиллу *b* оказалось максимальным при использовании красно-белого спектра (RW). Уровень накопления каротиноидов оказался высоко зависимым как от генетики конкретных сортов, так и от характера используемых светодиодов [28].

На стадии адаптации микрорастений к условиям *ex vitro* наблюдали достоверные различия по формированию

листьев в зависимости от технологии адаптации. Наибольшее количество листьев было выявлено у микрорастений в климатической камере у сорта Гном (7,5-8,7 шт.) и Челнок (8,3-9,0 шт.) в отношении традиционной технологии (5,0-5,5 шт.) адаптации (рис. 3). Среднее количество сформировавшихся листьев на одно микрорастение не показало статистически значимых различий между разными видами светового воздействия. Это свидетельствует о сходстве темпов морфогенеза и формирования вегетативных структур у исследованных сортов независимо от спектрального состава освещения.

В ходе исследований была проведена оценка корреляционной зависимости между вегетационным индексом NDVI и уровнем общего содержания хлорофилла (*a+b*) при разных условиях адаптации микроклонов

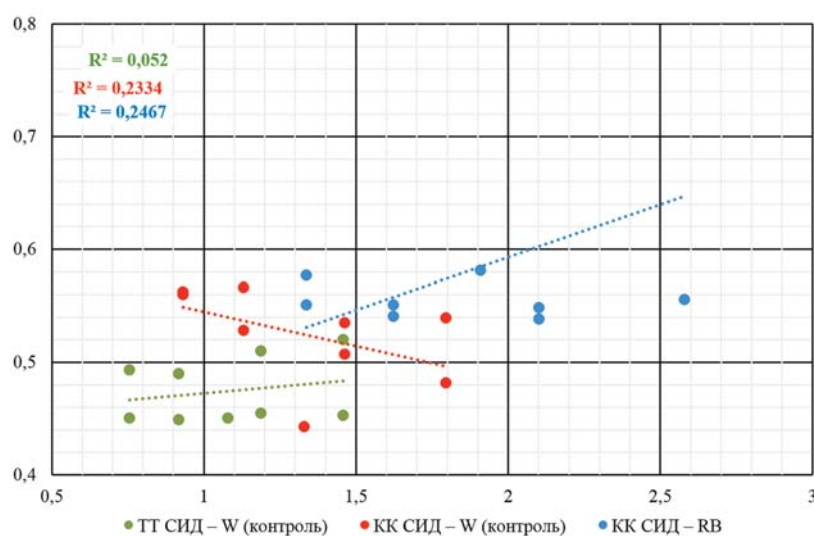


Рис. 4. Корреляционный анализ между общим содержанием хлорофилла (*a+b*) и вегетационным индексом NDVI при анализе физиологического состояния микрорастений томата сорта Гном по завершению периода адаптации *ex vitro*; R^2 – коэффициент детерминации
 Fig. 4. Correlation analysis between the total chlorophyll content (*a+b*) and the NDVI vegetation index in the analysis of the physiological state of tomato microplants of the Gnom variety at the end of the *ex vitro* adaptation period; R^2 is the determination coefficient

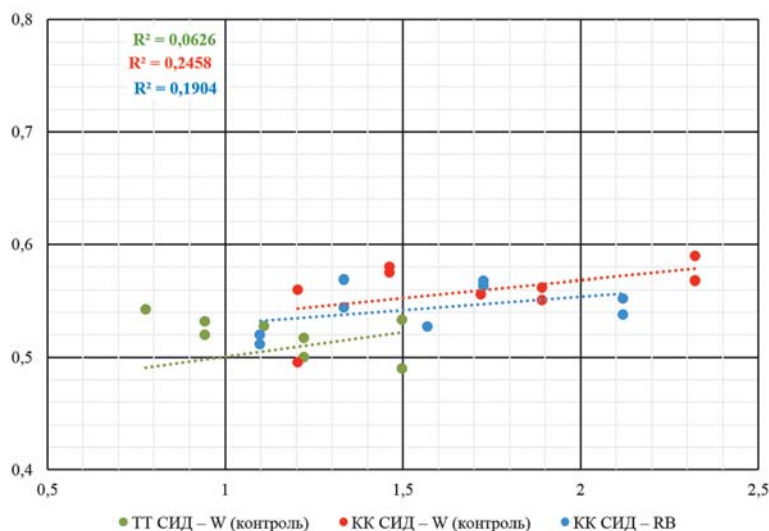


Рис. 5. Корреляционный анализ между общим содержанием хлорофилла (*a+b*) и вегетационным индексом NDVI при анализе физиологического состояния микрорастений томата сорта Челнок по завершению периода адаптации *ex vitro*; R^2 – коэффициент детерминации
 Fig. 5. Correlation analysis between the total chlorophyll content (*a+b*) and the NDVI vegetation index in the analysis of the physiological state of tomato microplants of the Chelnok variety at the end of the *ex vitro* adaptation period; R^2 is the determination coefficient

томата. По результатам анализа установлено, что коэффициент детерминации (R^2) у микрорастений томата сорта Гном при традиционной технологии (ТТ) адаптации был занижен (0,052) по сравнению с адаптацией в климатической камере (КК) (0,2334...0,2467) (рис. 4). Вероятно, это связано с тем, что критическим аспектом для выживания растений в процессе адаптации является развитие эффективной устьичной регуляции транспирации [29], поскольку основной проблемой после переноса из среды *in vitro* в среду *ex vitro* является высокая скорость потерь воды растениями.

Статистический анализ данных выявил невысокую степень взаимосвязи между уровнем общего содержания хлорофилла (a+b) и величиной вегетационного индекса NDVI у микрорастений томата сорта Челнок, выращиваемых по традиционной технологии (ТТ) адаптации. Коэффициент детерминации составил 0,0626, что указывает на слабую корреляционную связь указанных переменных (рис. 5).

В рамках экспериментов по адаптации микроклонов томата в климатической камере (КК) величина коэффициента детерминации находилась в пределах от 0,1904 до 0,2458, что указывает на умеренную зависимость между содержанием хлорофилла и вегетационным индексом NDVI. Важно отметить, что применение различных типов светодиодной обработки не привело к обнаружению статистически значимых различий между отдельными вариантами опыта.

Заключение

Для сорта Гном технология адаптации в климатической камере предусматривает использование красно-синего спектра, так как он обеспечил максимальный уровень фотосинтетической активности (прирост индек-

са NDVI до 0,58) и интенсивный синтез хлорофилла а (увеличение на 82,2%). Важнейшим результатом исследования являлось выявление определяющей роли спектрального состава освещения как управляющего фактора в процессе адаптации. Была установлена четкая генотип-специфическая реакция изучаемых сортов томата на спектр, что исключает универсальный подход к выбору светового режима и определяет необходимость разработки индивидуальных протоколов для каждого сорта.

На основании полученных данных сформулированы агротехнологические рекомендации. Для сорта Гном технология адаптации в климатической камере предусматривает использование красно-синего спектра, так как он обеспечил максимальный уровень фотосинтетической активности (прирост индекса NDVI до 0,58) и интенсивный синтез хлорофилла а (увеличение на 82,2%). Для сорта Челнок наилучший результат технологии адаптации наблюдался при использовании белого спектра, который позволил получить наибольшие значения NDVI (0,56) и максимальное накопление каротиноидов (прирост на 81%). Производственные схемы для сортов Гном и Челнок должны основываться на принципиально различных световых режимах.

Таким образом, основным практическим предложением является обязательное введение в технологический процесс этапа подбора освещения для каждого сорта. Использование индивидуальных световых протоколов, основанных на предварительной оценке состояния растений, обеспечит стабильное производство качественного посадочного материала с заданными характеристиками, что важно для создания специализированных сортов и повышения эффективности современных систем выращивания.

• Литература / References

1. Anwar A., Ashfaq M., Habib S., Ahmad M.S., Mazhar H.S.U.D., Müller-Xing R., Javed M.A. Improving the nutraceutical content of tomato (*Lycopersicon esculentum*) by advanced environmental conditions and agricultural practices. *Advancements in Life Sciences*. 2025;12(1):13-22.
2. Larkin P. Somaclonal variation: Origin and causes. In *Encyclopedia of Plant and Crop Science*; Goodman, R.M., Ed.; Marcel Dekker: New York, NY, USA, 2004; pp. 1158-1161.
3. Areche F.O., Gondal A.H., Sumarriva-Bustinza L.A., Zela-Payá N.O., Sumarriva-Hustinza I.M., Oscanoa-León R.H., Calcina-Sotelo A.F., Anguilar M.C.T.T.D., Lopez E.R.A., Julcahuanga-Dominguez I.A., Flores D.D.C., Huayapa M.A.C., Donayre E.M.F., Rodriguez A.R., Cruz Z.L.D.L., Huaman C.W.T., Gamarra F.B.L. Role of biotechnology in food security: A review. *SABRAO J. Breed. Genet.* 2023;55(5):1496-1509. <http://doi.org/10.54910/sabrao2023.55.5.5>
4. Jawad Z.A., Türker M., Özdemir F.A. Effect of different plant growth regulator on *in vitro* propagation of endangered plant; yellow tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Int. J. Agric. For. Life Sci.* 2020;4(1):92-98.
5. Baye E., Matewos T., Belew D., Effect of 6-Benzyl Amino

Purine on *In Vitro* Multiplication of Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) Varieties using Shoot Explant. *J. Plant. Sci. Agric. Res.* 2020;4:32.

6. Baczek K., Pawełczak A., Przybył J.L., Kosakowska O., Węglarz Z. Secondary Metabolites of Various *Eleutherococcus Senticosus*/Rupr. et Maxim./Maxim) Organs Derived from Plants Obtained by Somatic Embryogenesis. In *Plant Cell and Tissue Differentiation and Secondary Metabolites: Fundamentals and Applications*; Ramawat K.G., Ekiert H.M., Goyal S., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2021; pp. 433-466. ISBN 978-3-030-30185-9.

7. Ahmed S., Wan Azizan W.A.S., Akhond M.A.Y., Juraimi A.S., Ismail S.I., Ahmed R., M Hatta M.A. Optimization of *In Vitro* Regeneration Protocol of Tomato cv. MT1 for Genetic Transformation. *Horticulturae*. 2023;9:800. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9070800>

8. El-Shafey N., Hassan N., Khodary S., Badr A. Differential *In vitro* Direct Regeneration of Tomato Genotypes on Various Combinations of Growth Regulators. *Biotechnology*. 2017;16:155-164. <https://doi.org/10.3923/biotech.2017.155.164>

9. Kumar N., Vijay Anand K.G., Reddy M.P. Plant regeneration of non-toxic *Jatropha curcas*-impacts of plant growth regulators, source and type of explants. *Journal of plant biochemistry and*

- biotechnology. 2011;20:125-133.
<https://doi.org/10.1007/s13562-011-0037-6>
10. Zhu G., Ma C., Yu S., Zhang X., Jiang J., Liu X. Transcriptome Analyses Reveal the Key Regulators of Tomato Compound Leaf Development. *Horticulturae*. 2023;9:363.
<https://doi.org/10.3390/horticulturae9030363>
11. Djibrilla A.S.M., Abdourahimou K.N., Issa S.M., Adamou H., Abdoukadi A.M., Illyassou K.M., Raban A. Exploring the Role of Active Photosynthetic Pigments in Tomato (*Solanum lycopersicum*) Crop Growth Process. *Journal of Scientific Research and Reports*. 2024;30(6):289-301.
<http://doi.org/10.9734/jsrr/2024/v30i62044>
12. Abdelkader M.M., Elsayed H.M. Biodiversity of Photosynthetic Pigments, Macronutrients Uptake and Fruit Quality of Tomato Genotypes. *Russ J Plant Physiol*. 2022;69:50.
<https://doi.org/10.1134/S1021443722030025>
13. Ritz T., Damjanovic A., Schulten K., Zhang J., Koyama Y. Efficient light harvesting through carotenoids. *Photosynth. Res*. 2000;66:125. <https://doi.org/10.1023/a:1010750332320>
14. Beatrice P., Chiatante D., Scippa G.S., Montagnoli A. Photoreceptors' Gene Expression of Arabidopsis Thaliana Grown with Biophilic LED-Sourced Lighting Systems. *PLoS ONE*. 2022;17:e0269868. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0269868>
15. Paradiso R., Proietti S. Light-Quality Manipulation to Control Plant Growth and Photomorphogenesis in Greenhouse Horticulture: The State of the Art and the Opportunities of Modern LED Systems. *J. Plant Growth Regul*. 2022;41:742-780.
<https://doi.org/10.1007/s00344-021-10337-y>
16. Gupta D.S., Jatothu B. Fundamentals and applications of light-emitting diodes (LEDs) in *in vitro* plant growth and morphogenesis. *Plant Biotechnol Rep*. 2013;7:211-220.
<https://doi.org/10.1007/s11816-013-0277-0>
17. Hwang H., An S., Lee B., Chun C. Improvement of Growth and Morphology of Vegetable Seedlings with Supplemental Far-Red Enriched LED Lights in a Plant Factory. *Horticulturae*. 2020;6(4):109. <https://doi.org/10.3390/horticulturae6040109>
18. Akimova S., Radzhabov A., Esaulko A., Samoshenkov E., Nechiporenko I., Kazakov P., Voskoboinikov Y., Matsneva A., Zubkov A., Aisanov T. Improvement of *Ex Vitro* Growing Completion of Highbush Blueberry (*Vaccinium Corymbosum* L.) in Containers. *Forests*. 2022;13:1550.
<https://doi.org/10.3390/f13101550>
19. Kobori M.M.R.G., da Costa Mello S., de Freitas I.S., Silveira F.F., Alves M.C., Azevedo R.A. Supplemental Light with Different Blue and Red Ratios in the Physiology, Yield and Quality of Impatiens. *Sci. Hortic*. 2022;306:111424.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111424>
20. Poukh A.V., Kobrinets T.P., Ivanova O.S. Methodological recommendations for lighting modes for domestic plum growing at the stages of micro-propagation, *in vitro* rooting and *ex vitro* adaptation. *Fruit Growing*. 2022;34:178-187.
<https://doi.org/10.3390/horticulturae11020149>
21. Zushi K., Suehara C., Shirai M. Effect of light intensity and wavelengths on ascorbic acid content and the antioxidant system in tomato fruit grown *in vitro*. *Scientia Horticulturae*. 2020;274:109673. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109673>
22. Tarakanov I.G., Kosobryukhov A.A., Tovstyyko D.A., Anisimov A.A., Shulgina A.A., Sleptsov N.N., Kirakosyan R.N. Effects of light spectral quality on the micropropagated raspberry plants during *ex vitro* adaptation. *Plants*. 2021;10(10):2071.
<https://doi.org/10.3390/plants10102071>
23. Nacheva L., Dimitrova N., Koleva-Valkova L., Tarakanov I., Vassilev A. Effect of LED lighting on the growth of raspberry (*Rubus idaeus* L.) plants *in vitro*. *Agric. Sci*. 2021;13:126-140.
<https://doi.org/10.22620/agricsci.2021.29.015>
24. Mitrofanova I.V. Fundamentals of creating an *in vitro* gene bank of species, varieties, and forms of ornamental, aromatic, and fruit crops. Simferopol: IT "ARIAL", 2018. 260 p. (in Russ.)
<https://doi.org/10.32514/978-5-9071118-87-4>
<https://www.elibrary.ru/yqbbfz>
25. Lichtenthaler H.K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in enzymology*. Academic Press, 1987;148:350-382.
26. Tretyakov N. Practical training in plant physiology. Quantitative determination of pigments. Moscow: Agropromizdat, 1990. Pp. 86-94. (in Russ.)
27. Sarshayeva M., Tashkenbayeva A., Bilibayeva A., Irsaliyeva Zh., Ustemirova A.M. Technological aspects of *in vitro* propagation of organic strawberries. *SABRAO J. Breed. Genet*. 2024;56(1):246-257.
<http://doi.org/10.54910/sabrao2024.56.1.22>
28. Panfilova O., Ryago N., Ondrasek G., Knyazeva I. V., Kahramanoğlu I., Vershinina O., Izmailov A.Yu., Dorokhov A.S. Optimizing Microclonal Propagation of Red Currant Cultivars: The Role of Nutrient Media, Sterilizers, and LED Lighting in Plant Adaptation. *Horticulturae*. 2025;11(2):149.
<https://doi.org/10.3390/horticulturae11020149>
29. Salgado Pirata M., Correia S., Canhoto J. *Ex Vitro* Simultaneous Acclimatization and Rooting of *In Vitro* Propagated Tamarillo Plants (*Solanum betaceum* Cav.): Effect of the Substrate and Mineral Nutrition. *Agronomy*. 2022;12:1082.
<https://doi.org/10.3390/agronomy12051082>

Об авторах:

Инна Валерьевна Князева – кандидат биол. наук, старший научный сотрудник,

<https://orcid.org/0000-0002-1065-1814>, SPIN-код: 4850-8967, автор для переписки, knyazewa.inna@yandex.ru

Екатерина Васильевна Журавлева – доктор с.-х. наук, профессор РАН,

<https://orcid.org/0000-0002-3253-0730>, SPIN-код: 5827-7319, zhuravla@yandex.ru

Елена Алексеевна Домблидес – кандидат с.-х. наук, зав. лабораторией репродуктивной биотехнологии

в селекции сельскохозяйственных растений, <https://orcid.org/0000-0002-2695-190X>,

SPIN-код: 4733-7540, edomblides@mail.ru

Яна Петровна Туксер – младший научный сотрудник лаборатории молекулярной генетики и цитологии,

<https://orcid.org/0000-0003-2305-1575>, SPIN-код: 8520-1999, yana-tukuser@mail.ru

About the Authors:

Inna V. Knyazeva – Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher,

<https://orcid.org/0000-0002-1065-1814>, SPIN-code: 4850-8967,

Corresponding Author, knyazewa.inna@yandex.ru

Ekaterina V. Zhuravleva – Dr. Sci. (Agriculture), Professor of the Russian Academy of Sciences,

<https://orcid.org/0000-0002-3253-0730>, SPIN-code: 5827-7319, zhuravla@yandex.ru

Elena A. Domblides – Cand. Sci. (Agriculture),

Head of Laboratory of Reproductive Biotechnology in Crop Breeding,

<https://orcid.org/0000-0002-2695-190X>, SPIN-code: 4733-7540, edomblides@mail.ru

Yana P. Tukuser – Junior Researcher,

Laboratory of Molecular Genetics and Cytology,

<https://orcid.org/0000-0003-2305-1575>, SPIN-code: 8520-1999, yana-tukuser@mail.ru