

Оптимизация условий искусственного досвечивания растений декоративных культур при их адаптации после клонального микроразмножения

Дубровский М. Л., Папихин Р. В., Муратова С. А.,
Кружков А. В., Чурикова Н. Л.

Мичуринский государственный аграрный университет,
г. Мичуринск
element68@mail.ru

Аннотация

Использование светодиодного досвечивания адаптируемых кассетных растений гейхеры и вейгелы после их клонального микроразмножения способствует компенсации низкого естественного уровня освещенности и продолжительности светового периода в осенне-зимний период, что приводит к существенному ускорению роста и накоплению биомассы листьев (площадь листовой пластинки, суммарная площадь листьев растения) как основных фотосинтезирующих органов. В сформированном листовом аппарате протекают ассимиляционные процессы, что определяет рост и развитие других органов растительного организма и влияет на массу всего растения. У изучаемых декоративных культур энергетические показатели источников освещения (ФАР, PPF, уровень освещенности) напрямую влияют на величину площади листовой пластинки и общую площадь листьев растения ($R=0,73...0,92$). Установлены положительные корреляции между долей в спектре фитоламп красного диапазона с массой листьев ($R=0,42...0,44$) и массой всего растения ($R=0,42...0,56$). При этом с увеличением доли синего спектрального диапазона отмечено снижение сухой массы основных органов растения и его общей массы ($R=-0,50...-0,78$). Наиболее высокие темпы роста и развития растений гейхеры и вейгелы отмечены в вариантах 4, 5 (светодиодные фитолампы полного спектра с интенсивной освещенностью) и 7 (фитолампа с красно-синим спектром и фиолетовым оттенком свечения), поэтому целесообразнее сократить продолжительность периода их адаптации в среднем в 1,5 раза. Это позволит увеличить за год количество циклов производства саженцев садовых культур ускоренными биотехнологическими методами – при последовательном сочетании клонального микроразмножения и адаптации растений в защищенном грунте, получив соответствующий стандартам питомниководства растительный материал.

Ключевые слова:

гейхера, вейгела, клональное микроразмножение, адаптация *ex vitro*, укорененные микрорастения, искусственное досвечивание, светодиодные источники освещения

Optimisation of conditions for artificial lighting of ornamental plants at their adaptation after clonal micropropagation

Dubrovsky M. L., Papikhin R. V., Muratova S. A.,
Kruzhkov A. V., Churikova N. L.

Michurinsk State Agrarian University,
Michurinsk
element68@mail.ru

Abstract

The use of LED supplementary lighting for adaptation of cassette plants of heuchera and weigela after their clonal micropropagation compensates for insignificant natural illumination and low duration of photoperiod at the autumn-winter time. Supplementary lighting largely accelerates growth and accumulation of leaf biomass (leaf blade area, total area of plant leaves) as leaves are the primary photosynthetic organs. The formed leaf apparatus is the action place of assimilation processes, which determine the growth and development of other plant organs and affect the total plant mass. In the studied ornamental crops, the energy indicators of light sources (PAR, PPF, illuminance level) directly affect the leaf blade area and the total leaf area indices ($R=0.73...0.92$). We have found positive correlations between the proportion of red range phytolamps in total spectrum with leaf mass ($R=0.42...0.44$) and total plant mass ($R=0.42...0.56$). Moreover, an increase in the proportion of blue spectral range is accompanied by a decrease in dry mass of the main plant organs and its total weight ($R=-0.50...-0.78$). The highest growth and development rates of heuchera and weigela plants are observed in Variants 4, 5 (full-spectrum LED phytolamps with high illuminance intensity) and 7 (a phytolamp with a red-blue spectrum and a violet tint of glow). Therefore, it is advisable to reduce the duration of their adaptation period by an average of 1.5 time. This, in turn, will allow for an increase in number of production cycles of horticultural seedlings per year using accelerated biotechnological methods – with a consistent combination of clonal micropropagation and plant adaptation in protected conditions (under glass) – to obtain plant material that meets high nursery standards.

Keywords:

heuchera, weigela, clonal micropropagation, *ex vitro* adaptation, rooted microplants, artificial supplementary lighting, LED light sources

Введение

Организация производства высококачественного посадочного материала плодовых, ягодных и декоративных культур является важной задачей отечественного агропромышленного комплекса, для получаемых растений разработан национальный стандарт питомниководства [1]. При этом определяющее значение имеют биологические особенности конкретной культуры и биологического вида. Так, многие декоративные растения характеризуются трудным укоренением в естественных условиях, невозможностью семенного размножения из-за расщепления хозяйственно-значимых признаков у сеянцев, медленными темпами роста, продолжительным периодом покоя, что значительно ограничивает получение их посадочного материала в большинстве стран мира при ежегодном сохранении повышенного спроса. В связи с этим саженцы многих декоративных культур являются одними из самых дорогостоящих в отрасли садоводства [2].

Способы вегетативного размножения обеспечивают точное сохранение сортовых признаков у получаемых растений, при этом характеризуются различной биологической и экономической эффективностью. Зеленое черенкование в сооружениях защищенного грунта с туманообразующими установками менее затратно в процессе организации, однако у отдельных культур не позволяет получить укорененные растения. Существенно более эффективным способом получения посадочного материала многих садовых культур является клональное микро-размножение, несмотря на значительные стартовые затраты при создании необходимой производственной инфраструктуры. При размножении растений в стерильной культуре *in vitro* высокие показатели процессов их пролиферации и ризогенеза обеспечиваются созданием оптимальных условий: составом органических и минеральных компонентов питательной среды, спектральным составом и уровнем освещенности источников искусственного освещения, постоянной температурой и фотопериодом в культуральной комнате [3–6]. Получаемые в результате клонального микро-размножения укорененные растения находятся в культуральных сосудах с абсолютной влажностью и комплексом всех необходимых компонентов питания в составе питательной среды, поэтому не могут быть сразу высажены в открытый грунт и требуют проведения этапа адаптации к нестерильным условиям. Для этого чаще всего используют пленочные малообъемные теплицы, где высаженные в пластиковые кассеты с торфяным субстратом укорененные микро-растения в течение нескольких недель адаптируются к постепенному снижению влажности воздуха. В этот период у них отмечают быстрое развитие корней в грунте, увеличение поверхности листового аппарата и переход на полностью автотрофное питание с помощью фотосинтеза, в связи с чем оптимизация условий процесса адаптации после клонального микро-размножения имеет важное значение для максимальной сохранности растений при переходе из *in vitro* в *ex vitro* [7–9]. Недостаточный уровень естественной освещенности при адаптации микро-растений и широкий выбор

доступных и энергоэффективных светодиодных источников позволяют использовать их для искусственного досвечивания фитостеллажей [10]. При этом установлено, что красный и синий спектральные диапазоны наиболее необходимы адаптируемым растениям для интенсивного протекания процессов фотосинтеза.

Среди декоративных растений в озеленении территорий широко используют как травянистые, так и кустарниковые формы, например различные сорта гейхеры и вейгелы. Гейхера – род многолетних неприхотливых травянистых растений семейства Камнеломковые, которые характеризуются развитием розетки крупных длинночерешковых листьев различной привлекательной окраски и формированием высоких цветоносов с множеством мелких ярких цветков. Декоративнолиственные и красивоцветущие сорта и гибридные формы гейхеры широко применяют в декоративном садоводстве и ландшафтном дизайне. Вейгела – род многолетних кустарниковых растений семейства Жимолостные, которые также широко используют при озеленении участков благодаря обильному цветению, высокой облиственности кустов и их пригодности к контурной обрезке. В нашей стране декоративные формы гейхеры и вейгелы пользуются большой популярностью, в связи с чем значительно увеличился спрос на их качественный посадочный материал. При размножении данных культур наиболее эффективным способом является клональное микро-размножение, позволяющее достичь высоких показателей мультипликации и ризогенеза микро-побегов [11–15].

Цель нашего исследования – изучение влияния спектрального состава и энергетических параметров различных вариантов искусственного досвечивания светодиодными источниками на рост и развитие укорененных микро-растений гейхеры гибридной и вейгелы цветущей при их адаптации *ex vitro* после клонального микро-размножения.

Материалы и методы

Исследования были проведены в 2025–2026 гг. в структурных подразделениях Мичуринского государственного аграрного университета – учебно-исследовательском тепличном комплексе и учебно-исследовательской лаборатории биотехнологии. Биологическими объектами исследования служили укорененные микро-растения гейхеры гибридной сорта *Binoche* и вейгелы цветущей сорта *Wings of Fire*, предварительно полученные методом клонального микро-размножения и высаженные в пластиковые кассеты на 54 ячейки (с объемом ячеек по 80 мл) в торфяной субстрат марки «Агробалт-С». Кассеты с высаженными растениями устанавливали на полках металлического стеллажа, закрытого со всех сторон прозрачной полиэтиленовой пленкой для поддержания высокой влажности воздуха. Каждая из семи полок стеллажа сверху была оснащена светодиодными светильниками в качестве источников искусственного досвечивания, проводимого на протяжении четырех недель – ежедневно по 4 ч в течение двух периодов: с 6:00 до 10:00 и с 16:00 до 20:00. Восьмая полка

стеллажа являлась контрольной, где не использовали досвечивание.

Спектральные и энергетические параметры вариантов искусственного досвечивания измеряли с помощью спектрометра Horoscolor HPCS310P (Китай). Перед началом эксперимента: анализировали спектрограммы, параметры фотосинтетически активной радиации (PAR, ФАР), плотности потока фотосинтетически активных фотонов (PPFD), уровень освещенности и процентное соотношение красного, желто-зеленого и синего диапазонов видимого участка спектра (рис. 1, 2; табл. 1).

Максимальные значения фотосинтетически активной радиации (ФАР) отмечены в вариантах 4 и 5, минимальные – в контроле, различие показателя в опыте составило 4,1 раза. Максимальные значения плотности потока фотосинтетически активных фотонов (PPFD) также отмечены в вариантах 4 и 5, минимальные – в контроле, различие показателя составило 5,1 раза. Максимальные значения уровня освещенности отмечены в варианте 5, минимальные – в контроле, различие показателя составило 6,2 раза. Все параметры светового режима растений в контроле, где не использовали искусственное досвечивание, оказались наименьшими в данном эксперименте. При использовании светодиодных источников отмечено более равномерное освещение поверхности полок стеллажа. На используемом фитостеллаже доля красного диапазона спектра в различных вариантах изменялась в 2,5 раза: от 28,8 % в варианте 3 до 73,3 % в варианте 7; желто-зеленого диапазона – в 5,1 раза: от 8,7 % в варианте 7 до 44,6 % в варианте 5; синего диапазона – в 1,6 раза: от 17,8 % в варианте 1 до 29,0 % в варианте 3 (рис. 2). Между соответствующими значениями энергетических параметров светодиодных источников ис-

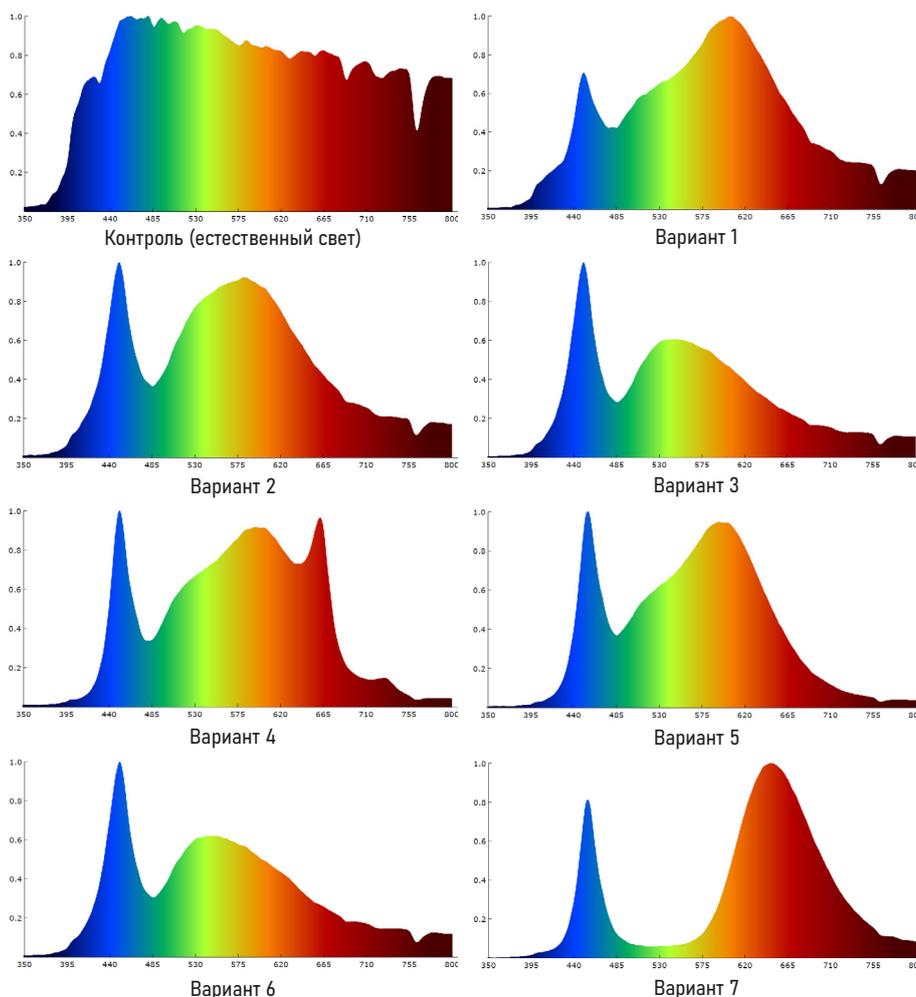


Рисунок 1. Спектральные кривые (спектрограммы) в различных вариантах искусственного досвечивания растений.

Figure 1. Spectral curves (spectrograms) in different variants of artificial lighting of plants.

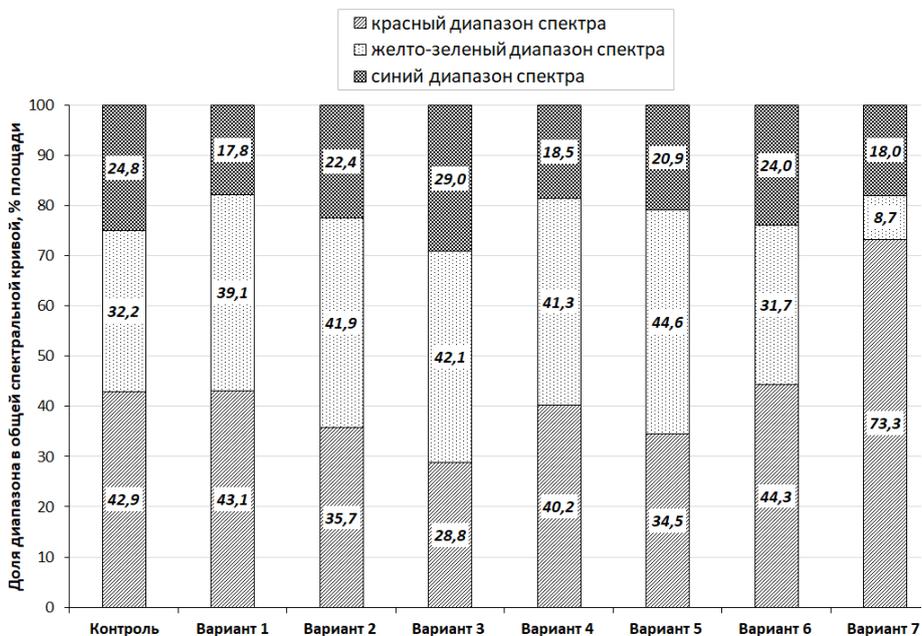


Рисунок 2. Удельное соотношение красного, желто-зеленого и синего диапазонов видимого участка спектра в различных вариантах искусственного досвечивания растений.

Figure 2. Specific ratio of red, yellow-green and blue ranges of the visible spectrum in different variants of artificial lighting of plants.

Энергетические параметры вариантов искусственного досвечивания растений

Таблица 1

Table 1

Energy parameters by variants of artificial lighting of plants

Вариант опыта	ФАР (PAR), мВт/см ²	PPFD, мкмоль/м ² /с	Уровень освещенности, люкс
Контроль	1,05±0,07	37,57±2,56	2098,5±138,8
Вариант 1	1,83±0,07	74,32±2,52	4673,2±151,8
Вариант 2	1,69±0,07	67,83±2,35	4406,7±131,9
Вариант 3	1,66±0,06	66,05±2,00	4232,2±114,5
Вариант 4	4,31±0,20	192,82±9,06	12304,6±585,3
Вариант 5	4,35±0,31	191,43±14,13	13035,2±998,0
Вариант 6	1,63±0,06	65,04±2,35	4184,0±133,8
Вариант 7	3,97±0,18	166,22±7,88	4886,1±228,6

кусственного досвечивания выявлены положительные корреляции высокого уровня: уровня освещенности и ФАР (R=0,85), уровня освещенности и PPFD (R=0,87), показателей ФАР и PPFD (R=0,99).

На 14-е и 28-е сутки определяли концентрацию основных пигментов – суммы хлорофиллов и каротиноидов, для этого с 10 предварительно отобранных растений срезали по две одновозрастные листовые пластинки. Вытяжки пигментов готовили в 96%-ном растворе этанола, а затем определяли их оптическую плотность с помощью двулучевого спектрофотометра VWR UV-6300PC (США), анализируя при длине волны 665 нм содержание хлорофилла *a*, 649 нм – хлорофилла *b*, 440 нм – каротиноидов. В листьях гейхеры определяли также концентрацию антоцианов при длине волн 510 и 657 нм в водных вытяжках с 1%-ным раствором соляной кислоты [16, 17]. Итоговую концентрацию каждого из пигментов выражали на единицу сухой массы листьев.

На 30-е сутки эксперимент прекращали, у растений измеряли длину, ширину и площадь листовой пластинки, листовой индекс; общую площадь и количество листьев; сухую массу корней, листьев, стеблевой части побегов и всего растения. Взвешивания проводили на аналитических весах с точностью до 0,0001 г. Площадь листовых пластинок определяли с помощью планшетного сканера: отдельно для 10 растений в каждом варианте опыта, затем полученные изображения открывали в графическом редакторе ImageJ и определяли значение площади сканированных листьев.

Обработку полученных количественных данных производили общепринятыми методами математической статистики [18] с использованием программной вычислительной среды Microsoft Office Excel 2016 и Statistica 10.0.

Результаты и их обсуждение

Анализ проведенных исследований выявил существенное различие показателей роста и развития изучаемых декоративных растений в период их адаптации в зависимости от варианта искусственного светодиодного досвечивания.

У контрольных растений гейхеры гибридной сорта *Binoche* за 30 суток адаптации отмечено увеличение средних показателей их листового аппарата: площади листьев – в 4,3 раза, количества листьев – в 1,2 раза, площади листовой пластинки – в 3,6 раза, листового индекса – на 6,1%. По окончании опыта между растениями гейхеры изучаемых вариантов зафиксированы существенные различия средних показателей, среди которых площади листового аппарата и листовой пластинки оказались наиболее изменчивыми в зависимости от показателей искусственного освещения, а листовой индекс – самым стабильным количественным признаком. Меньшие различия кассетных растений гейхеры между вариантами досвечивания отмечены по количеству листьев, которые в 1,6 раза превышали показатель контроля, в то время как площадь листовой пластинки и общая площадь листьев экспериментальных растений были соответственно в 2,4 и 2,5 раз выше контрольных значений (табл. 2).

У кассетных растений гейхеры сорта *Binoche* к окончанию периода адаптации максимальное накопление в листьях основных фотосинтетических пигментов – суммы хлорофиллов и каротиноидов, отмечено в вариантах 1, 4 и 6 (табл. 3). Для данной декоративной культуры период вегетации растений с 14-х на 28-е сутки характеризовался продолжением синтеза и накопления пигментов листьев во всех вариантах, что свидетельствует о положительном влиянии досвечивания на данный процесс, протекающий в листьях на всем протяжении их адаптации. Установлены положительные корреляции высокого уровня между накоплением хлорофиллов и каротиноидов как на 14-е, так и на 28-е сутки: R=0,92 и 0,70 соответственно, дина-

Таблица 2

Морфометрические показатели листового аппарата растений гейхеры гибридной сорта *Binoche* на этапе адаптации

Table 2

Morphometric parameters of the leaf apparatus of hybrid heuchera plants of the *Binoche* variety at the adaptation stage

Варианты опыта	Площадь листьев, см ²	Количество листьев, шт.	Площадь листовой пластинки, см ²	Длина листовой пластинки, см	Ширина листовой пластинки, см	Листовой индекс (длина/ширина)
На момент начала опыта						
После <i>in vitro</i>	15,0	30,7	0,5	0,7	0,8	0,82
Через 30 суток с начала опыта						
Контроль	64,5	36,4	1,8	1,3	1,5	0,87
Вариант 1	109,4	34,0	3,2	1,8	2,0	0,88
Вариант 2	89,0	34,0	2,7	1,7	1,8	0,93
Вариант 3	66,7	22,2	3,1	1,7	2,0	0,86
Вариант 4	157,2	36,2	4,4	2,1	2,4	0,88
Вариант 5	116,0	29,6	3,9	2,0	2,3	0,87
Вариант 6	62,7	24,6	2,7	1,7	1,9	0,89
Вариант 7	128,0	34,0	3,9	2,0	2,3	0,87
НСР ₀₅	5,8	2,2	0,5	0,2	0,2	0,02
Различие значений max/min, раз	2,5	1,6	2,4	1,6	1,6	1,1

Примечание. Здесь и в табл. 3–7: минимальные значения показателей по окончании опыта выделены жирным шрифтом; максимальные – подчеркнуты.
Note. Here and in Tables 3–7: the minimum values of the indicators at the end of the experiment are in bold; the maximum values are underlined.

Таблица 3

Влияние искусственного досвечивания на концентрацию пигментов в листьях растений гейхеры гибридной сорта *Binoche* на этапе адаптации

Table 3

The effect of artificial lighting on the concentration of pigments in leaves of hybrid heuchera plants of the *Binoche* variety at the adaptation stage

Вариант опыта	Концентрация пигментов в листьях, мг/г сухой массы					
	суммы хлорофиллов (a+b)			каротиноидов		
	на 14-е сутки	на 28-е сутки	изменение, %	на 14-е сутки	на 28-е сутки	изменение, %
Контроль	0,361	0,532	47,4	0,082	0,098	19,5
Вариант 1	0,346	0,652	88,4	0,080	0,125	56,3
Вариант 2	0,311	0,517	66,2	0,073	0,108	47,9
Вариант 3	0,386	0,589	52,6	0,087	0,120	37,9
Вариант 4	0,287	0,668	132,8	0,074	0,147	98,6
Вариант 5	0,363	0,539	48,5	0,086	0,123	43,0
Вариант 6	0,286	0,620	116,8	0,070	0,130	85,7
Вариант 7	0,250	0,491	96,4	0,072	0,122	69,4
НСР ₀₅	0,011	0,013	-	0,004	0,006	-
Различие значений max/min, раз	1,5	1,4	-	1,2	1,5	-

Таблица 4

Влияние искусственного досвечивания на массу растений гейхеры гибридной сорта *Binoche* на этапе адаптации

Table 4

The effect of artificial lighting on the mass of hybrid heuchera plants of the *Binoche* variety at the adaptation stage

Вариант опыта	Сухая масса органов растения, г			Сухая масса растения, г	Доля органов в сухой массе растения, %	
	корней	листьев	стеблей		листьев	корней
Контроль	0,05	0,13	0,04	0,22	60,3	23,1
Вариант 1	0,16	0,24	0,11	0,50	48,6	30,2
Вариант 2	0,09	0,17	0,06	0,32	53,5	27,7
Вариант 3	0,10	0,16	0,06	0,32	49,4	33,2
Вариант 4	0,12	0,43	0,18	0,73	60,3	14,3
Вариант 5	0,11	0,29	0,12	0,53	55,1	21,7
Вариант 6	0,06	0,12	0,04	0,23	54,0	27,0
Вариант 7	0,11	0,39	0,17	0,67	58,4	16,3
НСР ₀₅	0,02	0,04	0,03	0,09	2,6	1,7
Различие значений max/min, раз	2,9	3,4	5,1	3,4	1,2	2,3

мика изменения концентраций данных пигментов во вторые две недели периода адаптации также происходит однонаправленно ($R=0,97$). При этом максимальная концентрация антоцианов, обеспечивающих привлекательную красно-фиолетовую окраску листьев данного сорта гейхеры, к моменту окончания опыта была установлена на уровне $0,005 \pm 0,0003$ мг/г сухой массы в вариантах 4, 5 (фитолампы полного спектра с высоким уровнем освещенности и PPFD) и 7 (фитолампа с красно-синим спектром), в то время как у контрольных растений концентрация антоцианов оказалась в 2,4 раза меньше.

На концентрацию суммы хлорофиллов как на 14-е, так и на 28-е сутки в наибольшей степени влияние оказывает доля желто-зеленого диапазона спектра ($R=0,45 \dots 0,66$), в то время как доля красного диапазона светодиодного источника оказывает отрицательное воздействие на данный процесс ($R=-0,36 \dots -0,75$). На концентрацию каротиноидов в первые 14 суток положительное влияние оказывают желто-зеленый и синий диапазоны досвечивания ($R=0,42 \dots 0,48$), а красный спектр вызывает ингибирование процесса ($R=-0,55$). Величины показателей ФАР (PAR), PPFD и уровня освещенности светодиодных источников к окончанию периода адаптации оказывают положительное влияние на накопление каротиноидов ($R=0,61 \dots 0,64$), тогда как на синтез хлорофилла их действие не выявлено на достоверном уровне.

За 30-дневный период адаптации искусственное досвечивание оказало значительное влияние на увеличение сухой массы растений гейхеры и их основных органов относительно уровня контроля: корней – в 2,9 раз, листьев – в 3,4, стеблевой части (розеток и черешков) – в 5,1, всего растения – в 3,4 раза. Все данные весовые показатели в контроле характеризовались минимальными значениями в данном эксперименте. Наиболее крупные растения выявлены в вариантах 4 и 7, им немного уступают варианты 1 и 5. Максимальная абсолютная масса корневой системы отмечена у растений гейхеры в варианте 1, а удельная доля корней – в вариантах 1 и 3. Максимальная доля листьев установлена на уровне $60,3 \pm 2,9$ % у контрольных растений (табл. 4). Между сухой массой листьев и корней отмечена положительная корреляция ($R=0,57$), в то время как между их удельными долями в массе растения выявлена отрицательная высокая корреляция ($R=-0,87$).

Отмечены высокие положительные корреляции между сухой массой листьев и показателями ФАР и PPFD ($R=0,91$), а также уровнем освещенности ($R=0,69$). Корреляции значений сухой массы корней и ФАР/PPFD установлены на значительно меньшем уровне ($R=0,44$), что свидетельствует о непосредственном влиянии параметров светодиодных фитоламп на накопление биомассы листьев как основных фотосинтезирующих органов растений, а уже затем интенсивность ассимиляционных процессов, про-

текающих в сформированном листовом аппарате, определяет рост и развитие других органов растительного организма.

В целом, светодиодное досвечивание адаптируемых кассетных растений гейхеры в осенне-зимний период способствует существенному ускорению их роста и развития вследствие компенсации недостаточного естественного уровня освещенности и нормализации условий протеканий фотосинтетических процессов. В связи с этим у растений в вариантах 4, 5 и 7 целесообразнее сократить продолжительность периода адаптации в среднем в 1,5 раза, что позволяет реализовывать их на 10 дней раньше контрольных.

У вейгелы сорта *Wings of Fire* также отмечено существенное влияние искусственного досвечивания на основные морфометрические показатели растений.

Влияние искусственного досвечивания на морфометрические показатели листового аппарата растений вейгелы цветущей сорта *Wings of Fire* на этапе адаптации

Table 5

The effect of artificial lighting on the morphometric parameters of the leaf apparatus of weigela florida plants of the *Wings of Fire* variety at the adaptation stage

Вариант опыта	Площадь листьев, см ²	Количество листьев, шт.	Площадь листовой пластинки, см ²	Длина листовой пластинки, см	Ширина листовой пластинки, см	Листовой индекс (длина/ширина)
На момент начала опыта						
После <i>in vitro</i>	11,2	19,2	0,6	1,1	0,7	1,81
Через 30 суток с начала опыта						
Контроль	86,6	20,2	4,5	3,0	1,5	1,94
Вариант 1	184,8	24,8	8,5	4,1	2,0	1,95
Вариант 2	128,4	17,4	7,4	4,1	2,0	1,96
Вариант 3	139,8	23,0	7,1	3,8	1,9	1,97
Вариант 4	216,3	20,8	10,7	4,8	2,3	2,00
Вариант 5	192,5	28,2	8,1	4,1	1,9	2,12
Вариант 6	127,3	22,4	6,1	3,5	1,7	2,02
Вариант 7	192,7	30,8	8,2	4,0	2,1	1,93
НСР ₀₅	10,6	4,6	0,9	0,3	0,2	0,05
Различие значений max/min, раз	2,5	1,8	2,4	1,6	1,5	1,1

Таблица 6

Влияние искусственного досвечивания на концентрацию пигментов в листьях растений вейгелы цветущей сорта *Wings of Fire* на этапе адаптации

Table 6

The effect of artificial lighting on the concentration of pigments in leaves of weigela florida plants of the *Wings of Fire* variety at the adaptation stage

Вариант опыта	Концентрация пигментов в листьях, мг/г сухой массы					
	суммы хлорофиллов (a+b)			каротиноидов		
	на 14-е сутки	на 28-е сутки	изменение, %	на 14-е сутки	на 28-е сутки	изменение, %
Контроль	0,204	0,164	-19,6	0,048	0,039	-18,8
Вариант 1	0,191	0,238	24,6	0,046	0,060	30,4
Вариант 2	0,221	0,209	-5,4	0,051	0,056	9,8
Вариант 3	0,231	0,204	-11,7	0,054	0,046	-14,8
Вариант 4	0,228	0,177	-22,4	0,059	0,065	10,2
Вариант 5	0,207	0,203	-1,9	0,054	0,064	18,5
Вариант 6	0,214	0,288	34,6	0,050	0,064	28,0
Вариант 7	0,189	0,183	-3,2	0,054	0,069	27,8
НСР ₀₅	0,008	0,011	-	0,003	0,004	-
Различие значений max/min, раз	1,2	1,8	-	1,3	1,8	-

(R=-0,75), розеточных стеблей (R=-0,78), корней (R=-0,61) и всего растения (R=-0,78). У вейгелы доля в спектре красного диапазона на среднем уровне коррелирует с массой листьев, стеблей и целого растения (R=0,42...0,56) и на высоком уровне – с массой корневой системы (0,83). При этом с увеличением доли синего спектрального диапазона фитолламп также отмечено снижение массы всех органов растений и их общей массы (R=-0,50...-0,70). У изучаемых нами

В контроле за период адаптации отмечено увеличение средних показателей листового аппарата: площади листьев – в 7,7 раза, количества листьев – на 5,2 %, площади листовой пластинки – в 2,4 раза, листового индекса – на 6,6 %. В контроле отмечены самые мелкие листья – с минимальными значениями линейных размеров и суммарной площади. Максимальными значениями данных показателей характеризовались растения в варианте 4 с максимальным уровнем освещенности и показателя плотности потока фотосинтетически активных фотонов (PPFD). Через 30 дней адаптации установлена изменчивость средних показателей листового аппарата растений вейгелы: общей площади листьев – в 2,5 раза, площади листовой пластинки – в 2,4, количества листьев – в 1,8 раза. В то же время во всех вариантах опыта значения листового индекса оказались сходными во всех вариантах, изменяясь не более чем на 9,8 % (табл. 5).

У адаптируемых растений вейгелы сорта *Wings of Fire* на 15-е сутки культивирования максимальная концентрация суммы хлорофиллов отмечена в вариантах досвечивания 3 и 4, а еще спустя 15 суток – в вариантах 2 и 6, при этом к концу периода адаптации хлорофилл в контроле, вариантах 3 и 4 начинает частично деградировать, что может свидетельствовать о неблагоприятных условиях для развития растений. На момент окончания эксперимента снижение концентрации каротиноидов относительно уровня, измеренного на 14-е сутки, отмечено только в контроле и варианте 3, в то время как в вариантах 1, 6 и 7 их накопление увеличилось на 27,8-30,4 % (табл. 6).

К окончанию периода адаптации у растений вейгелы сухая масса органов значительно различалась в зависимости от варианта искусственного досвечивания: корней – в 9,5 раз, листьев – в 4,3, стеблей – в 4,1, целого растения – в 4,9 раза (табл. 7, рис. 3). При этом контрольные растения характеризовались минимальными весовыми характеристиками. Доля листьев в сухой массе растения изменялась в 1,2 раза, корней – в 2,4. Между сухой массой листьев и корней установлена положительная корреляция среднего уровня (R=0,67), а между их удельными долями в общей массе растений – отрицательная высокая корреляция (R=-0,94).

Отмечены высокие положительные корреляции между сухой массой листьев и показателями ФАР и PPFD (R=0,97), а также уровнем освещенности (R=0,76). Корреляции значений сухой массы корней и ФАР/PPFD установлены на значительно меньшем уровне (R=0,56...0,60).

У изучаемых декоративных культур отмечено общее сходство во влиянии спектральных диапазонов досвечивания на сухую массу органов. У гейхеры установлены положительные корреляции между долей в спектре фитолламп красного диапазона с массой листьев (R=0,44) и массой всего растения (R=0,42), в то время как доля синего диапазона отрицательно влияла на сухую массу листьев

Таблица 7
Влияние искусственного досвечивания на массу растений вейгелы цветущей сорта *Wings of Fire* на этапе адаптации

Table 7
The effect of artificial lighting on the mass of weigela florida plants of the *Wings of Fire* variety at the adaptation stage

Вариант опыта	Сухая масса органов растения, г			Сухая масса растения, г	Доля органов в сухой массе растения, %	
	корней	листьев	стеблей		листьев	корней
Контроль	0,02	0,14	0,05	0,21	65,7	10,6
Вариант 1	0,04	0,34	0,11	0,49	67,7	9,2
Вариант 2	0,07	0,24	0,07	0,38	62,3	18,4
Вариант 3	0,05	0,27	0,09	0,40	65,8	11,9
Вариант 4	0,07	0,61	0,18	0,86	70,2	8,9
Вариант 5	0,07	0,52	0,14	0,74	70,1	10,5
Вариант 6	0,04	0,24	0,07	0,35	67,4	11,9
Вариант 7	0,22	0,59	0,21	1,02	57,8	21,6
НСР ₀₅	0,02	0,06	0,04	0,14	2,8	1,9
Различие значений max/min, раз	9,5	4,3	4,1	4,9	1,2	2,4

щие ткани листьев, обеспечивая формирование площади ассимилирующей поверхности. Данный процесс характерен для всех высших растений и может быть использован для направленного управления продукционных биологических процессов для стимулирования их роста и развития [19].

Таким образом, искусственное досвечивание микрорастений на этапе их адаптации с помощью светодиодных фитоламп непосредственно влияет на накопление биомассы листьев (площадь листовой пластинки, суммарная площадь листьев растения) как основных фотосинтезирующих органов. В свою очередь в сформированном листовом аппарате протекают ассимиляционные процессы, интенсивность которых зависит от массы и площади листьев, что определяет рост и развитие других органов растительного организма и влияет на массу всего растения.

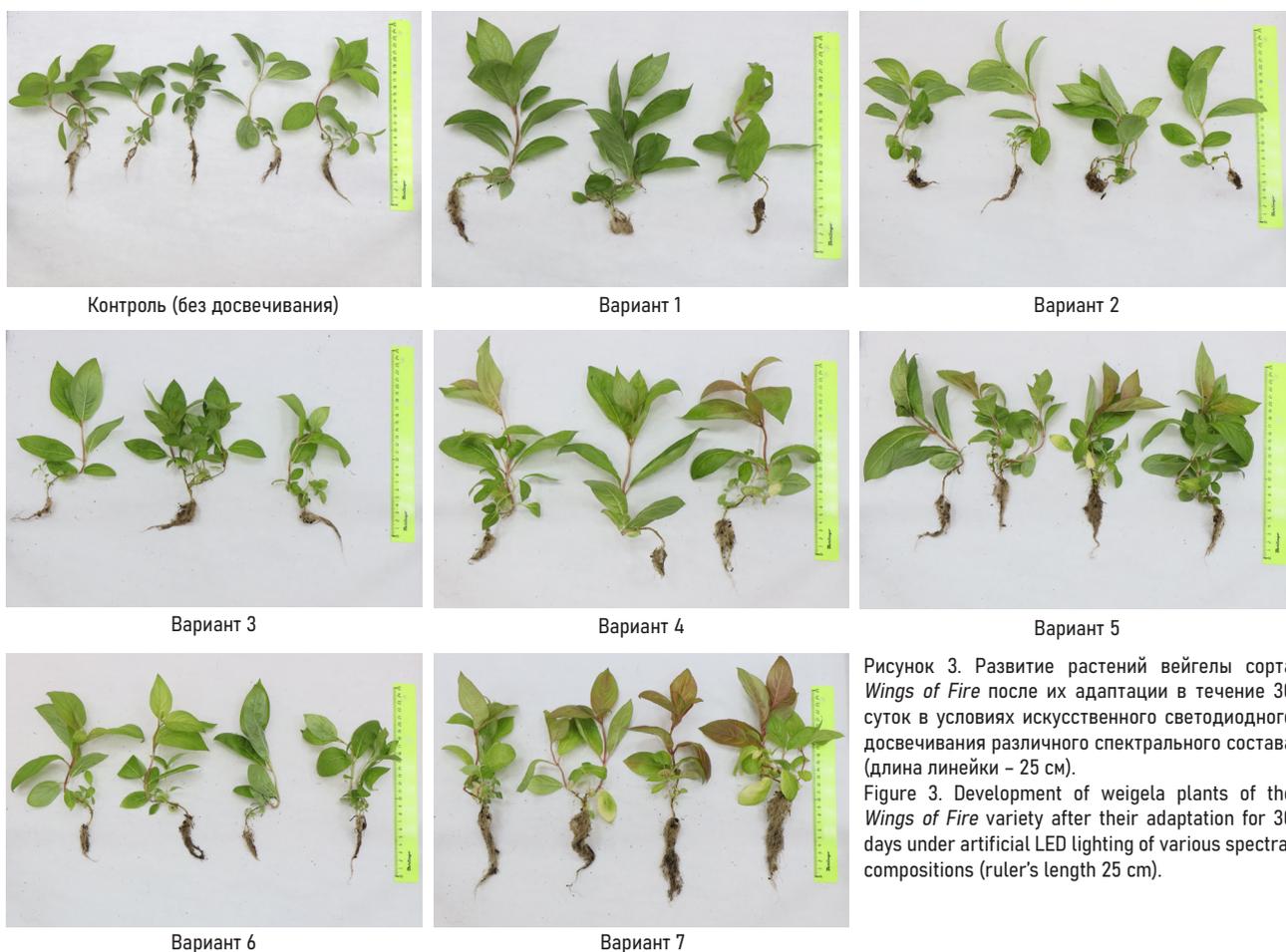


Рисунок 3. Развитие растений вейгелы сорта *Wings of Fire* после их адаптации в течение 30 суток в условиях искусственного светодиодного досвечивания различного спектрального состава (длина линейки – 25 см).

Figure 3. Development of weigela plants of the *Wings of Fire* variety after their adaptation for 30 days under artificial LED lighting of various spectral compositions (ruler's length 25 cm).

в эксперименте декоративных культур энергетические показатели источников освещения (ФАР, PPFД, уровень освещенности) напрямую влияют на величину площади листовой пластинки и общую площадь листьев растения ($R=0,73...0,92$). Так как клетки корней не поглощают данный спектр освещения, то главное влияние используемые спектральные диапазоны оказывают на фотосинтезирую-

Использование светодиодного досвечивания адаптируемых кассетных растений декоративных культур способствует компенсации низкого естественного уровня освещенности и продолжительности светового периода в осенне-зимний период, что нормализует протекание фотосинтетических процессов и приводит к существенному ускорению их роста в период адаптации. В связи с этим

у растений в вариантах 4, 5 (светодиодные фитолампы полного спектра) и 7 (биколорная фитолампа с красно-синим спектром и фиолетовым оттенком свечения) целесообразнее сократить продолжительность периода адаптации в среднем в 1,5 раза. Это позволит за единицу времени увеличить количество циклов производства саженцев садовых культур ускоренными биотехнологическими методами – при последовательном сочетании клонального микроразмножения и адаптации растений в защищенном грунте, получив соответствующий стандартам питомниководства растительный материал.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источники и литература

1. ГОСТ Р 59370-2021 «Зеленые» стандарты. Посадочный материал декоративных растений. – М.: Стандартинформ, 2021. – 42 с.
2. Prakash, J. Micropropagation of ornamental perennials: progress and problems / J. Prakash // Acta Horticulturae. – 2007. – Vol. 812. III International Symposium on Acclimatization and Establishment of Micropropagated Plants. – P. 289-294.
3. Pandey, S. Chapter 15. Clonal propagation / S. Pandey // Recent Advances in Agronomy. – 2022. – P. 155.
4. Муратова, С. А. Биотехнологические аспекты размножения плодовых и ягодных культур / С. А. Муратова // Биология растений и садоводство: теория, инновации. – 2017. – Т. 144, № 2. – С. 84-89.
5. Гущин, А. В. Оптимизация технологии клонального микроразмножения современных сортов декоративных культур / А. В. Гущин, Е. А. Калашникова, Р. Н. Киракосян // Sciences of Europe. – 2019. – № 38, вып. 2. – С. 28-31.
6. Bertsouklis, K. Seed germination and micropropagation of ornamental plants / K. Bertsouklis, E. Kartsonas, A. Carra // Horticulturae. – 2024. – Vol. 10. – Iss. 6. – P. 541.
7. *In vitro* microclonal propagation of strawberries and *ex vitro* adaptation // A. Batukaev, S. Kornatskyi, T. Minkina [et al.] // International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference: SGEM. – 2019. – Vol. 19. – Iss. 6.1. – P. 737-745.
8. Adaptation features of Kamchatka bilberry (*Vaccinium praestans* Lamb.) plants grown *in vitro* / N. R. Sungurova, S. S. Makarov, A. I. Chudetsky [et al.] // Lesnoy Zhurnal [Russian Forestry Journal]. – 2025. – № 3. – P. 121-131.
9. Innovative technologies for cloned plants adaptation / E. A. Kalashnikova, D. R. Ganaeva, A. A. Desiaterik [et al.] // Caspian Journal of Environmental Sciences. – 2021. – Vol. 19. – Iss. 5. – P. 877-882.
10. Влияние спектрального состава светодиодного досвечивания на рост и развитие микрорастений рода *Rubus* L. на этапе адаптации / М. Л. Дубровский, Р. В. Папихин, С. А. Муратова [и др.] // Достижения науки и техники АПК. – 2024. – Т. 38, № 9. – С. 17-24.
11. Гусева, М. В. Особенности регенерации разных сортов *Heuchera* и *×Heucherella* в культуре *in vitro* / М. В. Гу-

сева, И. Л. Крахмалева // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». – 2021. – № 4. – С. 1-11.

12. Development and comparative analysis of initiation ability in large-scale *Heuchera* propagation using tissue culture versus cuttings / C. Xu, H. Guo, Z. Wang, Y. Chen // Scientific Reports. – 2023. – Vol. 13. – Iss. 1. – P. 14785.
13. *In vitro* culture of *Heuchera villosa* 'Caramel' / H. Q. Zhao, Q. H. He, L. L. Song [et al.] // Hort. Science. – 2017. – Vol. 52. – Iss. 4. – P. 622-624.
14. Особенности клонального микроразмножения высокодекоративных культиваров вейгелы / Т. С. Стахеева, О. Г. Васильева, Л. Н. Коновалова [и др.] // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2022. – Вып. 8. – С. 61-68.
15. Micropropagation of *Weigela florida* 'Tango' through *in vitro* shoot culture / X. Wang, Y. Li, H. Zeng [et al.] // Hort. Science. – 2017. – Vol. 52. – Iss. 2. – P. 274-277.
16. Wintermans, J. E. G. Spectrophotometric characteristics of chlorophyll a and b and their pheophytins in ethanol / J. E. G. Wintermans, A. De Mots // Biochimica et Biophysica Acta. – 1965. – Vol. 109. – P. 448-453.
17. Оценка антиоксидантного статуса растений различных экологических групп Куршской косы / Г. Н. Чупахина, П. В. Масленников, Л. Н. Скрыпник [и др.] // Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. Сер. Естественные науки. – 2010. – Вып. 7. – С. 77-83.
18. Доспехов, Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) / Б. А. Доспехов. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.
19. Light regulation of chlorophyll biosynthesis in plants / F. Wang, J. Yan, X. Chen [et al.] // Acta Hort. Sin. – 2019. – Vol. 46. – P. 975-994.

References

1. GOST R 59370-2021. «Zelenye» standarty. Posadochnyj material dekorativnyh rastenij ["Green" standards. Planting material of ornamental plants]. – Moscow: Standartinform, 2021. – 42 p.
2. Prakash, J. Micropropagation of ornamental perennials: progress and problems / J. Prakash // Acta Horticulturae. – 2007. – Vol. 812. III International Symposium on Acclimatization and Establishment of Micropropagated Plants. – P. 289-294.
3. Pandey, S. Chapter 15. Clonal propagation / S. Pandey // Recent Advances in Agronomy. – 2022. – P. 155.
4. Muratova, S. A. Biotekhnologicheskie aspekty raznozheniya plodovyh i yagodnyh kultur [Biotechnological propagation aspects of fruit and berry crops] / S. A. Muratova // Biologiya rastenij i sadovodstvo: teoriya, innovacii [Plant Biology and Horticulture: Theory, Innovation]. – 2017. – Vol. 144, № 2. – P. 84-89.
5. Gushchin, A. V. Optimizaciya tekhnologii klonalnogo mikroraznozheniya sovremennyh sortov dekorativnyh kultur [Optimisation of the clonal micropropagation

- technology of modern varieties of ornamental crops] / A. V. Gushchin, E. A. Kalashnikova, R. N. Kirakosyan // Sciences of Europe. – 2019. – № 38, Iss. 2. – P. 28–31.
6. Bertsouklis, K. Seed germination and micropropagation of ornamental plants / K. Bertsouklis, E. Kartsonas, A. Carra // Horticulturae. – 2024. – Vol. 10. – Iss. 6. – P. 541.
 7. *In vitro* microclonal propagation of strawberries and *ex vitro* adaptation // A. Batukaev, S. Kornatskiy, T. Minkina [et al.] // International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference: SGEM. – 2019. – Vol. 19. – Iss. 6.1. – P. 737–745.
 8. Adaptation features of Kamchatka bilberry (*Vaccinium praestans* Lamb.) plants grown *in vitro* / N. R. Sungurova, S. S. Makarov, A. I. Chudetsky [et al.] // Lesnoy Zhurnal [Russian Forestry Journal]. – 2025. – № 3. – P. 121–131.
 9. Innovative technologies for cloned plants adaptation / E. A. Kalashnikova, D. R. Ganaeva, A. A. Desiaterik [et al.] // Caspian Journal of Environmental Sciences. – 2021. – Vol. 19. – Iss. 5. – P. 877–882.
 10. Vliyanie spektralnogo sostava svetodiodnogo dosvechivaniya na rost i razvitie mikrorastenij roda *Rubus* L. na etape adaptacii [The effect of the LED supplementary lighting spectral composition on the growth and development of microplants of the genus *Rubus* L. at the adaptation stage] / M. L. Dubrovsky, R. V. Papikhin, S. A. Muratova [et al.] // Dostizheniya nauki i tekhniki APK [Achievements of Science and Technology in Agroindustrial Complex]. – 2024. – Vol. 38. – № 9. – P. 17–24.
 11. Guseva, M. V. Regeneration features of different *Heuchera* and *Heucherella* varieties cultivated *in vitro* / M. V. Guseva, I. L. Krakhmaleva // Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnyh nauk i tekhnologii «Integral» [International Journal of Applied Sciences and Technologies “Integral”]. – 2021. – № 4. – P. 1–11.
 12. Development and comparative analysis of initiation ability in large-scale *Heuchera* propagation using tissue culture versus cuttings / C. Xu, H. Guo, Z. Wang, Y. Chen // Scientific Reports. – 2023. – Vol. 13. – Iss. 1. – P. 14785.
 13. *In vitro* culture of *Heuchera villosa* ‘Caramel’ / H. Q. Zhao, Q. H. He, L. L. Song [et al.] // Hort. Science. – 2017. – Vol. 52. – Iss. 4. – P. 622–624.
 14. Osobennosti klonalnogo mikrorazmnozheniya vysokodekorativnyh kultivarov vejgely [Features of clonal micropropagation of highly ornamental weigela cultivars] / T. S. Stakheeva, O. G. Vasilyeva, L. N. Konovalova [et al.] // Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy. – 2022. – Iss. 8. – P. 61–68.
 15. Micropropagation of *Weigela florida* ‘Tango’ through *in vitro* shoot culture / X. Wang, Y. Li, H. Zeng [et al.] // Hort. Science. – 2017. – Vol. 52. – Iss. 2. – P. 274–277.
 16. Wintermans, J. E. G. Spectrophotometric characteristics of chlorophyll a and b and their pheophytins in ethanol / J. E. G. Wintermans, A. De Mots // Biochimica et Biophysica Acta. – 1965. – Vol. 109. – P. 448–453.
 17. Assessment of antioxidant status of plants of different ecological groups from the Curonian Spit / G. N. Chupakhina, P. V. Maslennikov, L. N. Skrypnik [et al.] // Bulletin of the Immanuel Kant Russian State University. Series “Natural Sciences”. – 2010. – Iss. 7. – P. 77–83.
 18. Dospekhov, B. A. Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezultatov issledovaniy) [Methods of field experiment (with the basics of statistical processing of research results)] / B. A. Dospekhov. – Moscow: Kolosagropromizdat, 1985. – 351 p.
 19. Light regulation of chlorophyll biosynthesis in plants / F. Wang, J. Yan, X. Chen [et al.] // Acta Hort. Sin. – 2019. – Vol. 46. – P. 975–994.

Благодарность (госзадание)

Исследования выполнены в рамках государственного задания FESU-2026-0001 по теме «Разработка системного подхода преодоления основных проблем этапа адаптации микрорастений в системе производства отечественного посадочного материала садовых культур методами биотехнологии» (регистрационный номер в ЕГИСУ НИОКТР 1025042500013-7-4.4.1).

Acknowledgments (state task)

The research was performed within the frames of the state task FESU-2026-0001 on the topic “Razrabotka sistemnogo podhoda preodoleniya osnovnyh problem etapa adaptacii mikrorastenij v sisteme proizvodstva otechestvennogo posadochnogo materiala sadovyh kultur metodami biotekhnologii [Development of a system approach to overcoming the main problems of the adaptation stage of microplants during production of Russian planting material of horticultural crops by biotechnology methods]” (EGISU NIOKTR registration number 1025042500013-7-4.4.1).

Информация об авторах:

Дубровский Максим Леонидович – кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией селекции слаброслых клоновых подвоев и других плодовых культур Мичуринского государственного аграрного университета; Scopus Author ID: 57204561635, <https://orcid.org/0000-0003-0883-2867>, SPIN-код: 8307-7988 (393760, Российская Федерация, Тамбовская область, г. Мичуринск, ул. Интернациональная, д. 101; e-mail: element68@mail.ru).

Папихин Роман Валериевич – кандидат сельскохозяйственных наук, проректор по научной и инновационной работе Мичуринского государственного аграрного университета; Scopus Author ID: 57204558808, <https://orcid.org/0000-0001->

8015-4242, SPIN-код: 3229-8781 (393760, Российская Федерация, Тамбовская область, г. Мичуринск, ул. Интернациональная, д. 101; e-mail: parom10@mail.ru).

Муратова Светлана Александровна – кандидат биологических наук, заведующий учебно-исследовательской лабораторией биотехнологии Мичуринского государственного аграрного университета; Scopus Author ID: 6507872460, <https://orcid.org/0000-0003-0783-5927>, SPIN-код: 7536-1118 (393760, Российская Федерация, Тамбовская область, г. Мичуринск, ул. Интернациональная, д. 101; e-mail: smuratova@yandex.ru).

Кружков Андрей Викторович – кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории селекции слаборослых клоновых подвоев и других плодовых культур Мичуринского государственного аграрного университета; Scopus Author ID: 59396109300, <https://orcid.org/0009-0005-7777-3305>, SPIN-код: 1662-6780 (393760, Российская Федерация, Тамбовская область, г. Мичуринск, ул. Интернациональная, д. 101; e-mail: crujckov@yandex.ru).

Чурикова Наталия Леонидовна – кандидат сельскохозяйственных наук, младший научный сотрудник лаборатории селекции слаборослых клоновых подвоев и других плодовых культур Мичуринского государственного аграрного университета; Scopus Author ID: 57360550300, <https://orcid.org/0009-0006-0264-2682>, SPIN-код: 2175-7254 (393760, Российская Федерация, Тамбовская область, г. Мичуринск, ул. Интернациональная, д. 101; e-mail: ch.natali19@mail.ru).

About the authors:

Maksim L. Dubrovsky – Candidate of Sciences (Agriculture), Head of the Breeding Laboratory of Low-Vigorous Clonal Rootstocks and Other Fruit Crops at the Michurinsk State Agrarian University; Scopus Author ID: 57204561635, <https://orcid.org/0000-0003-0883-2867>; SPIN-code: 8307-7988 (101 Internatsionalnaya str., Michurinsk, Tambov Region, 393760, Russian Federation; e-mail: element68@mail.ru).

Roman V. Papikhin – Candidate of Sciences (Agriculture), Vice-Rector for Research and Innovation Work at the Michurinsk State Agrarian University; Scopus Author ID: 57204558808, <https://orcid.org/0000-0001-8015-4242>, SPIN-code: 3229-8781 (101 Internatsionalnaya str., Michurinsk, Tambov Region, 393760, Russian Federation; e-mail: parom10@mail.ru).

Svetlana A. Muratova – Candidate of Sciences (Biology), Head of the Biotechnology Teaching and Research Laboratory at the Michurinsk State Agrarian University; Scopus Author ID: 6507872460, <https://orcid.org/0000-0003-0783-5927>, SPIN-code: 7536-1118 (101 Internatsionalnaya str., Michurinsk, Tambov Region, 393760, Russian Federation; e-mail: smuratova@yandex.ru).

Andrey V. Kruzhkov – Candidate of Sciences (Agriculture), Senior Researcher at the Breeding Laboratory of Low-Vigorous Clonal Rootstocks and Other Fruit Crops of the Michurinsk State Agrarian University; Scopus Author ID: 59396109300, <https://orcid.org/0009-0005-7777-3305>, SPIN-code: 1662-6780 (101 Internatsionalnaya str., Michurinsk, Tambov Region, 393760, Russian Federation; e-mail: crujckov@yandex.ru).

Natalia L. Churikova – Candidate of Sciences (Agriculture), Junior Researcher at the Breeding Laboratory of Low-Vigorous Clonal Rootstocks and Other Fruit Crops of the Michurinsk State Agrarian University; Scopus Author ID: 57360550300, <https://orcid.org/0009-0006-0264-2682>, SPIN-code: 2175-7254 (101 Internatsionalnaya str., Michurinsk, Tambov Region, 393760, Russian Federation; e-mail: ch.natali19@mail.ru).

Для цитирования:

Оптимизация условий искусственного досвечивания растений декоративных культур при их адаптации после клонового микроразмножения / М. Л. Дубровский, Р. В. Папихин, С. А. Муратова [и др.] // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Сельскохозяйственные науки». – 2026. – № 1 (86). – С. 26–35.

For citation:

Optimizaciya uslovij iskusstvennogo dosvechivaniya rastenij dekorativnyh kultur pri ih adaptacii posle klonalnogo mikrorazmnozheniya [Optimisation of conditions for artificial lighting of ornamental plants at their adaptation after clonal micropropagation] / M. L. Dubrovsky, R. V. Papikhin, S. A. Muratova [et al.] // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Agricultural Sciences". – 2026. – № 1 (86). – P. 26–35.

Дата поступления рукописи: 02.02.2026

Прошла рецензирование: 12.02.2026

Принято решение о публикации: 16.02.2026

Received: 02.02.2026

Reviewed: 12.02.2026

Accepted: 16.02.2026