ТРУДЫ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
ИНСТИТУТА ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА

www.journal.spb-niilh.ru
ISSN 2079-6080

DOI 10.21178/2079-6080.2026.2.67
УДК 630*236.9:57.04:581.1

Комплексное исследование влияния спектрального состава светодиодного освещения на рост, фотосинтез и анатомическую структуру листьев березы пушистой (*Betula pubescens*) на этапах *in vitro* и *ex vitro*

© П.М. Евлаков

A comprehensive study of the influence of the spectral composition of LED lighting on the growth, photosynthesis and anatomical structure of the leaves of downy birch (*Betula pubescens*) at the *in vitro* and *ex vitro*

P.M. Evlakov (Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov)

LED irradiators allow flexible control of the spectral composition and intensity of light for growing forest planting material, yet data on the birch response to the LED spectrum remain fragmentary. The paper presents a comprehensive study of the response of downy birch (*Betula pubescens* Ehrh.) line 15-1 to various spectral modes of LED irradiators during clonal micropropagation *in vitro* (21 days, 50 μmol/m^2·s) and subsequent growing in protected ground (60 days, 100 μmol/m^2·s). Growth, photosynthetic and anatomical leaf traits were assessed under different blue-to-red light ratios. The optimal spectrum for both stages was an equal ratio of blue and red light (50 % B + 50 % R). *In vitro*, raising the proportion of red light (up to 80 % R + 20 % B) did not affect shoot height but reduced leaf number by 22 %, increased leaf area by 36–45 % and raised stomatal density by 31–96 % at unchanged stomatal size. Leaf thickness decreased by 8–10 % owing to a 20–22 % reduction in palisade parenchyma, while the spongy parenchyma remained unchanged. In the greenhouse, the 50/50 spectrum provided maximum dry biomass (1.5 g, 2.1 times the control), leaf area (17.7 cm^2) and total assimilation surface (218 cm^2) with an optimal shoot-to-root ratio. No correlation was found between instantaneous leaf photosynthesis and productivity ($r < 0.3$); leaf area was a reliable predictor of biomass ($r = 0.92$). The recommended regime shortens production of standard seedlings to three months and allows three rotations per year in heated greenhouses.

Key words: birch, *Betula pubescens*, LED lighting, spectral composition, *in vitro*, *ex vitro,* leaf anatomy, stomata, photosynthesis, productivity

Комплексное исследование влияния спектрального состава светодиодного освещения на рост, фотосинтез и анатомическую структуру листьев березы пушистой (*Betula pubescens*) на этапах *in vitro* и *ex vitro*

П.М. Евлаков

Светодиодные облучатели позволяют гибко регулировать спектральный состав и интенсивность света при выращивании посадочного материала лесных культур, однако данные о реакции березы на спектр светодиодного освещения остаются фрагментарными. В работе представлены результаты комплексного изучения реакции березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.) гибрида 15-1 на различные спектральные режимы светодиодных облучателей на этапе клонального микроразмножения *in vitro* (21 сутки, 50 мкмоль/м^2·с) и последующего доращивания в условиях защищенного грунта (60 суток, 100 мкмоль/м^2·с). Оценивали ростовые, фотосинтетические и анатомо-морфологические показатели листа при разном соотношении синего и красного света. Установлено, что оптимальным спектром для обоих этапов является равное соотношение синего и красного света (50 % С + 50 % К). В культуре *in vitro* увеличение доли красного света (до 80 % К + 20 % С) не влияет на высоту побегов, но снижает число листьев на 22 %, увеличивает площадь отдельного листа на 36–45 % и повышает плотность устьиц на 31–96 % при неизменных их размерах. Одновременно толщина листа уменьшается на 8–10 % за счет сокращения палисадной паренхимы на 20–22 %, тогда как губчатая паренхима не изменяется. В теплице спектр 50/50 обеспечивает максимальную сухую биомассу (1,5 г, в 2,1 раза выше контроля), площадь листа (17,7 см^2) и суммарную ассимиляционную поверхность (218 см^2) при оптимальном соотношении надземной и подземной частей растения. Выявлено отсутствие корреляции между интенсивностью фотосинтеза листа и продуктивностью ($r < 0,3$); надежным предиктором биомассы служит площадь листовой поверхности ($r = 0,92$). Рекомендованный режим освещения сокращает срок выращивания стандартных сеянцев до трех месяцев и позволяет проводить три ротации в год в отапливаемых теплицах.

Ключевые слова: береза пушистая, *Betula pubescens*, светодиодное освещение, спектральный состав, *in vitro*, *ex vitro,* анатомия листа, устьица, фотосинтез, продуктивность

Евлаков Петр Михайлович – заведующий лабораторией анализа ПЦР НИИ ИТЛК, канд. биол. наук

E-mail: peter.evlakov@yandex.ru

ФГБОУВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова»

394087, Воронеж, ул. Тимирязева, д. 8

Телефон: +7(473) 253–72–90

E-mail: lesteh@vglta.vrn.ru

Введение

В осенне-зимний период при выращивании посадочного материала лесных культур в теплицах возникает необходимость в искусственном досвечивании, поскольку естественного света недостаточно для полноценного развития. Светодиодные облучатели (СД) позволяют гибко регулировать спектральный состав и интенсивность света, обеспечивая высокую энергоэффективность и низкое тепловыделение [9, 13]. Для основных лесообразующих пород, в том числе березы, данные о влиянии спектра LED-освещения на рост, физиологические процессы и анатомическую структуру листа остаются фрагментарными.

Береза пушистая (*Betula pubescens* Ehrh.) – ценный вид, широко используемый в лесовосстановлении и плантационном лесовыращивании. Ранее было показано, что даже близкородственные виды березы могут по-разному реагировать на соотношение синего, красного и дальнего красного света [5]. Кроме того, остается открытым вопрос о связи между интенсивностью фотосинтеза листьев и накоплением биомассы у древесных растений при искусственном облучении [6].

Цель настоящей работы – оценить влияние различных вариантов спектрального состава светодиодных облучателей на анатомо-морфологические характеристики листьев в условиях *in vitro*, а также на рост, биомассу, фотосинтез и транспирацию при доращивании в защищенном грунте; выявить оптимальные спектральные режимы для массового получения качественного посадочного материала березы пушистой.

Объекты и методы исследования

Объектом служили растения березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.) гибрида 15-1, полученные методом клонального микроразмножения *in vitro*. Растения были отобраны по признакам засухоустойчивости в Едином генетико-селекционном комплексе Воронежской области. Эксперимент проводили в условиях *in vitro* (клональное микроразмножение) с последующим доращиванием в условиях защищенного грунта (теплица).

Микрорастения (*in vitro*) культивировали в климатической камере KBV 400 (Binder, Германия) при 16-часовом фотопериоде и освещенности 50 мкмоль/м^2·с на этапе мультипликации на среде Woody plant medium (WPM). Для эксперимента использовали светодиодные облучатели производства НПП «Воронежский центр светотехники» с тремя вариантами спектра (соотношение красного и синего света): 80/20; 70/30 и 50/50 (контроль). Длительность экспозиции под СД составила 21 сутки.

На этапе *in vitro* проводили измерения высоты побегов, учитывали число листьев (n = 30), определяли площадь листа и суммарной листовой поверхности (площадь листа × число листьев) – с помощью портативного лазерного измерителя CI-202, CID Bio-Science, США, толщину листа, высоту верхнего эпидермиса, палисадной и губчатой паренхимы, нижнего эпидермиса. Анатомические срезы листьев верхушечного побега фиксировали в глицерине, просматривали под микроскопом Variant Jenamed (Carl Zeiss Jena). Плотность и размеры устьиц определяли на нижней стороне листа по методу Н.А. Анели [1] (не менее 30 измерений на вариант). Статистические исследования проводили на основе t-критерия Стьюдента (различия достоверны при $p < 0,05$), используя программу Statistica 12.6.

Микрорастения в возрасте 30 дней после высадки в нестерильные условия (торфяной субстрат «Пельгорское-М», объем контейнеров 500 см^3) выращивали в отапливаемой теплице «Питомнического комплекса Воронежской области». Использовали светодиодные облучатели VCSI-HC01.00–40-TR-RB-XXX-U (VCS Lighting, Россия) с пятью вариантами спектра (табл. 1).

Таблица 1

Варианты спектральных характеристик для тепличного эксперимента

Вариант опыта	Спектральные характеристики света, %			
	Синий (С)	Красный (К)	Дальний красный (ДК)	Белый (Б)
В1	10	70	20	-
В2	20	70	10	-
В3	50	50	-	-
В4	30	70	-	-
Контроль	-	-	-	100

Интенсивность освещения составляла 100 мкмоль/м^2·с, фотопериод – 16 часов (с 5:00 до 21:00). Температура: днем 22–24 °С, ночью 18–19 °С. Полив, подкормка микроудобрениями и рыхление проводили по стандартной схеме.

На этапе доращивания в условиях защищенного грунта проводили измерения высоты и диаметра растений (12 повторностей), сырой и сухой биомассы листьев, стебля, корня (высушивание при 100 °С до постоянной массы), площади листа (CI-202), удельной поверхностной плотности листа (УПП = сухая масса листа / площадь листа). Интенсивность фотосинтеза (μmol CO_2·м$^{-2}$·с$^{-1}$), устьичная проводимость, транспирация (mmol·м$^{-2}$·с$^{-1}$) измерялись при помощи портального газоанализатора CI-340 (CID Bioscience, США) при PPFD 650 мкмоль/м^2·с, температуре листа 25–30 °С и влажности 60 %. Измерения проводили с 10 до 14 часов на не отделенных от растения листьях (5 повторностей).

Результаты и их обсуждение

Увеличение доли красного света (варианты 1 и 2) на этапе *in vitro* не оказало достоверного влияния на высоту побегов березы пушистой по сравнению с контролем. Во всех вариантах высота побегов составляла 2,8–3,1 см. Однако число листьев достоверно уменьшалось: в варианте 1 – на 22 %, в варианте 2 – на 20 % относительно контроля (контроль – 9,0 ± 0,6 листа). Это указывает на то, что изменение доли синего света (с 50 до 20–30 %) замедляет заложение новых листьев у микроклонов березы.

В отличие от числа листьев, площадь отдельного листа на этапе *in vitro* достоверно увеличивалась при повышении доли красного света: в варианте 1 (80/20) – на 36 %, в варианте 2 (70/30) – на 45 % по сравнению с контролем (контроль – 2,2 ± 0,1 см^2). Соответственно, суммарная листовая поверхность также возросла: в варианте 1 – на 64 %, в варианте 2 – на 118 % относительно контроля. Таким образом, красный свет стимулировал экспансию листовой пластинки, но не компенсировал снижение числа листьев.

Плотность устьиц на нижней стороне листа на этапе *in vitro* значительно возрастала при увеличении доли красного света (табл. 2).

Таблица 2

Параметры устьиц листа микроклонов березы пушистой *in vitro*

Показатель	Параметры устьиц листа (M ± SEM, n = 30)		
	Вариант 1 (80К/20С)	Вариант 2 (70К/30С)	Контроль (50К/50С)
Плотность устьиц, шт./мм^2	83,9 ± 5,1*	124,9 ± 7,6*	63,9 ± 3,6

Длина устьиц, мкм	37,2 ± 0,9	41,2 ± 1,8	40,3 ± 1,8
Ширина устьиц, мкм	29,7 ± 1,4	32,9 ± 1,8	30,5 ± 1,6

Примечание. *p < 0,05 по отношению к контролю.

В варианте 2 (70/30) плотность устьиц была на 96 % выше контроля, в варианте 1 (80/20) – на 31 %. При этом длина и ширина устьиц у березы достоверно не изменялись (p > 0,05). Увеличение числа устьиц при неизменных размерах может улучшать газообмен и поступление CO_2 в лист.

Облучение микроклонов березы СД с повышенной долей красного света на этапе *in vitro* приводило к достоверным изменениям толщины листа и его тканей (табл. 3).

Таблица 3

Параметры мезоструктуры листа микроклонов березы пушистой *in vitro*

Параметры мезоструктуры листа	Значения показателей (M ± SEM, n = 30), мкм		
	Вариант 1 (80K/20C)	Вариант 2 (70K/30C)	Контроль (50K/50C)
Верхний эпидермис	16,5 ± 0,9	14,6 ± 0,6*	16,2 ± 0,5
Палисадная паренхима	19,2 ± 1,0*	19,5 ± 0,5*	24,5 ± 1,1
Губчатая паренхима	30,1 ± 1,1	32,7 ± 1,1	32,3 ± 1,9
Нижний эпидермис	13,4 ± 0,6	10,6 ± 0,4*	13,0 ± 0,4
Толщина листа	79,2 ± 2,9	77,5 ± 1,2*	85,9 ± 2,9

Примечание. *p < 0,05 по отношению к контролю.

Толщина листа уменьшалась на 8–10 % по сравнению с контролем, главным образом за счет уменьшения высоты палисадной паренхимы на 20–22 %. Высота губчатой паренхимы оставалась на уровне контроля. В варианте 2 также отмечено снижение высоты нижнего эпидермиса (на 18 %). Верхний эпидермис достоверно уменьшился только в варианте 2. Эти изменения свидетельствуют о том, что изменение доли синего света (с 50 до 20–30 %) нарушало нормальное развитие фотосинтетической ткани, делая лист более тонким и с менее развитой палисадной паренхимой.

Установлено, что спектр 50K/50C является оптимальным для формирования анатомически полноценного листа — с максимальной толщиной и высотой палисадной паренхимы. Увеличение доли красного света стимулирует экспансию листа и рост плотности устьиц, но привело к истончению мезофилла и снижению числа листьев.

Показатель высоты растений березы пушистой во всех опытных вариантах (B1–B4) на этапе доращивания в теплице увеличивался относительно контроля в 1,7–2,1 раза (максимальное превышение относится к варианту B3 (50K/50C)). Диаметр корневой шейки растений в опытных вариантах в среднем составлял 3,7 ± 0,2 мм против 3,4 ± 0,2 мм в контроле (различия недостоверны).

Сухая биомасса растений, площадь листа и суммарная листовая поверхность на этапе доращивания в теплице также были максимальны при соотношении света 50/50 (табл. 4).

Таблица 4

Масса надземной и подземной частей березы пушистой (сухая масса) в теплице

Вариант опыта	Масса различных частей растений, г				УПП листа, г/см^2	Отношение надз./подз. частей
	Листья	Стебли	Корни	Всего		
В1	0,6 ± 0,0	0,2 ± 0,0	0,4 ± 0,0	1,2 ± 0,1	0,63	2,1
В2	0,7 ± 0,0	0,2 ± 0,0	0,4 ± 0,0	1,2 ± 0,1	0,66	2,2
В3	0,8 ± 0,1	0,2 ± 0,0	0,4 ± 0,0	1,5 ± 0,1	0,66	2,4
В4	0,7 ± 0,0	0,2 ± 0,0	0,5 ± 0,0	1,4 ± 0,1	0,73	2,0
Контроль	0,3 ± 0,1	0,1 ± 0,0	0,3 ± 0,0	0,7 ± 0,2	0,92	1,5

При соотношении синего и красного цвета 50/50 сухая биомасса растения достигала 1,5 ± 0,1 г, что в 2,1 раза выше контроля (0,7 ± 0,2 г). Площадь отдельного листа в В3 составляла 17,7 ± 1,3 см^2 (контроль – 7,7 ± 1,6 см^2), а суммарная ассимиляционная поверхность – 218,3 ± 12,9 см^2 (контроль – 71,5 ± 22,1 см^2). Удельная поверхностная плотность листа (УПП) во всех опытных вариантах была ниже контрольной (0,63–0,73 г/см^2 против 0,92 г/см^2), что указывает на формирование более тонких, но более крупных листьев.

Соотношение надземной и подземной частей у всех опытных растений на этапе доращивания в теплице находилось в пределах 2,0–2,4 (контроль – 1,5), что свидетельствует о нормальном развитии корневой системы, без угнетения.

Измерения газообмена на этапе доращивания в теплице не выявили достоверных различий между вариантами по интенсивности фотосинтеза (табл. 5). Значения колебались от 9,6 (В4) до 12,5 (контроль) μmol $CO_2 \cdot м^{-2} \cdot с^{-1}$. Наибольшая интенсивность транспирации отмечена в варианте В4 (3,4 mmol$\cdot м^{-2} \cdot с^{-1}$), наименьшая – в В3 (2,1 mmol$\cdot м^{-2} \cdot с^{-1}$).

Корреляционный анализ показал отсутствие связи между интенсивностью фотосинтеза и сухой биомассой ($r < 0,3$), а также высокую тесную корреляцию между площадью листа и сухой биомассой ($r = 0,92$), а также между суммарной листовой поверхностью и биомассой ($r = 0,94$).

Таблица 5

Фотосинтетические показатели и продуктивность березы пушистой в теплице

Вариант опыта	Фотосинтез, μmol$\cdot м^{-2} \cdot с^{-1}$	Транспирация, mmol$\cdot м^{-2} \cdot с^{-1}$	Площадь листа, см^2	Суммарная листовая поверхность, см^2	Сухая биомасса, г
В1	12,1	2,3	13,5 ± 0,9	187,3 ± 13,6	1,2 ± 0,1
В2	11,4	3,2	13,5 ± 1,0	186,2 ± 14,8	1,2 ± 0,1
В3	12,3	2,1	17,7 ± 1,3	218,3 ± 12,9	1,5 ± 0,1
В4	9,6	3,4	13,2 ± 0,7	187,1 ± 13,0	1,4 ± 0,1
Контроль	12,5	2,4	7,7 ± 1,6	71,5 ± 22,1	0,7 ± 0,2

Полученные результаты свидетельствуют о высокой видоспецифичности реакции березы пушистой на спектральный состав светодиодного освещения, причем закономерности, выявленные на этапе *in vitro*, в целом сохраняются и при доращивании в теплице.

На этапе *in vitro* увеличение доли красного света (до 70–80 %) за счет снижения доли синего (до 20–30 %) приводило к парадоксальному эффекту: площадь отдельного листа и плотность устьиц возрастали, но общее число листьев, толщина листа и высота палисадной паренхимы снижались. Это указывает на то, что красный свет через фитохромную систему стимулирует клеточное растяжение (экспансию листа) [7], тогда как синий свет необходим для поддержания меристематической активности (заложения новых листьев) и дифференцировки палисадной паренхимы [2, 3]. Полученные нами данные согласуются с результатами на лещине [12] и осине [4], где снижение доли синего света также приводило к истончению листа. Увеличение плотности устьиц (на 96 % в варианте 70/30) можно интерпретировать как компенсаторную реакцию, направленную на улучшение газообмена при уменьшении ассимиляционной площади мезофилла [11]. Однако, несмотря на более высокую плотность устьиц, общая продуктивность растений в вариантах с преобладанием красного света (оцененная после пересадки в теплицу) была ниже, чем при равном соотношении (50/50).

В тепличных условиях оптимальным для роста, накопления биомассы и развития ассимиляционной поверхности оказался спектр 50 % С + 50 % К (вариант В3). Синий свет через криптохромную систему активирует рост клеток паренхимы, увеличивает толщину листа и содержание хлоропластов [8, 10]. Для березы пушистой, которая в естественных условиях часто произрастает на более влажных и менее освещенных местообитаниях по сравнению с березой повислой, высокая доля синего света (50 %) оказывается необходимой для полноценного развития. Добавление дальнего красного света (варианты В1 и В2) не улучшало, а в некоторых случаях снижало продуктивность по сравнению с В3, что согласуется с данными о том, что дальний красный свет может вызывать синдром избегания тени (вытягивание стебля в ущерб биомассе) у видов, не адаптированных к затенению [14].

Отсутствие корреляции между кратковременными измерениями интенсивности фотосинтеза и накоплением биомассы ($r < 0,3$) – важный результат, подтверждающий данные, полученные ранее для тополя [6] и других древесных растений. Это означает, что при подборе оптимальных спектров для лесных культур в теплицах нельзя полагаться только на кратковременные измерения фотосинтеза. Более надежными критериями являются площадь листа и суммарная ассимиляционная поверхность, которые в нашем исследовании показали высокую корреляцию с продуктивностью ($r > 0,9$). Вероятно, у древесных растений интегральный фотосинтез за весь период вегетации определяется прежде всего размером листового аппарата, а не скоростью ассимиляции CO_2 в отдельный момент.

Сравнение этапов *in vitro* и *ex vitro* показало, что положительный эффект баланса синего и красного света (50/50) сохранялся и после пересадки растений в теплицу. Однако даже кратковременное (21 день) воздействие спектров с преобладанием красного вызывало стойкие анатомические изменения (истончение листа, снижение палисадной паренхимы), которые могут снижать продуктивность в дальнейшем. Поэтому для этапа микроразмножения березы пушистой также рекомендуется использовать равное соотношение синего и красного (50/50), несмотря на то, что в чистой культуре *in vitro* увеличение площади листа под красным светом может создавать ложное впечатление о лучшем развитии.

Предложенный режим освещения (50 % С + 50 % К, PPFD 100 мкмоль/м^2·с, фотопериод 16 ч) позволял в 2,1 раза увеличить сухую биомассу растений по сравнению с белым светом и сокращал срок полу-

чения стандартного посадочного материала (высота ≥ 15 см, диаметр ≥ 2,0 мм) до трех месяцев вместо двух лет при традиционной агротехнике. Это дает возможность проводить 3 ротации в год в отапливаемых теплицах и значительно повышать экономическую эффективность селекционно-семеноводческих центров и питомнических хозяйств.

Заключение

Проведенные исследования на стадии *in vitro* показали, что оптимальный спектр для анатомического развития листа микроклонов березы пушистой – равное соотношение синего и красного света (50 % С + 50 % К) при PPFD 50 мкмоль/м^2·с. В этих условиях формировалась максимальная толщина листа (85,9 мкм), высота палисадной паренхимы (24,5 мкм) и число листьев (9,0 на побег). Увеличение доли красного света (до 80 % за счет снижения доли синего до 20 %) вызывало снижение числа листьев (на 22 %), увеличение площади отдельного листа (на 36–45 %), повышение плотности устьиц (на 31–96 %), уменьшение толщины листа (на 8–10 % за счет сокращения палисадной паренхимы на 20–22 %); при этом высота губчатой паренхимы оставалось неизменной. Несмотря на компенсаторное увеличение площади листа и плотности устьиц, спектры с преобладанием красного света не являлись оптимальными для формирования полноценной фотосинтетической ткани листа у березы пушистой, так как приводили к истончению мезофилла и снижению числа листьев.

Оптимальным освещением для роста и продуктивности березы пушистой в защищенном грунте теплиц являлся спектр 50 % С + 50 % К (вариант В3) при PPFD 100 мкмоль/м^2·с и фотопериоде 16 ч. Этот режим обеспечивал: максимальную высоту растений (превышение контроля в 2,1 раза); наибольшую сухую биомассу – 1,5 ± 0,1 г (в 2,1 раза выше контроля); максимальную площадь отдельного листа – 17,7 см^2 (в 2,3 раза выше контроля); наибольшую суммарную ассимиляционную поверхность – 218 м^2 (в 3,0 раза выше контроля) и оптимальное соотношение надземной / подземной частей растения (2,4).

Варианты с добавлением дальнего красного света (В1, В2) или с соотношением 30/70 (В4) также повышали продуктивность по сравнению с контролем, но уступали варианту В3 (сухая биомасса на 20 % ниже).

Интенсивность фотосинтеза листьев не коррелировала с накоплением биомассы ($r < 0,3$). Максимальная продуктивность в варианте В3 достигалась при средних значениях фотосинтеза (12,3 μmol·м$^{-2}$·с$^{-1}$), тогда как в контроле фотосинтез выше (12,5), а биомасса – в 2,1 раза ниже. Это указывает на то, что кратковременные измерения фотосинтеза листа, вероятно, не могут служить критерием при селекции спектров для древесных растений.

Надежными предикторами продуктивности являлись площадь отдельного листа и суммарная ассимиляционная поверхность, которые тесно коррелировали с сухой биомассой ($r = 0,92–0,94$). Эти параметры рекомендуется использовать в качестве основных при оптимизации световых режимов для березы пушистой.

Сквозной оптимум для обоих этапов (микроразмножение *in vitro* и доращивание в теплице) – спектр 50 % С + 50 % К. Применение этого режима на этапе *in vitro* обеспечивает формирование анатомически полноценных листьев (максимальная толщина, высокая палисадная паренхима, оптимальное число листьев), что положительно сказывается на последующей адаптации и выращивании стандартного посадочного материала березы пушистой в теплице.

Срок выращивания стандартных сеянцев (высота ≥ 15 см, диаметр ≥ 2,0 мм) при рекомендованном освещении сокращается до трех месяцев (с учетом этапа адаптации),

что позволяет проводить 3 ротации в год в отапливаемых теплицах.

Для питомнических хозяйств рекомендуется: использовать светодиодные облучатели с соотношением 50 % синего (пик 475 нм) и 50 % красного (пик 660 нм), PPFD 100 мкмоль/м^2·с, фотопериод 16 часов; применять этот режим как на этапе *in vitro* (при сниженной плотности 50 мкмоль/м^2·с), так и при доращивании в теплице; в качестве контрольного критерия эффективности ростовой функции при выращивании стандартного посадочного материала береы пушистой использовать площадь листа и суммарную ассимиляционную поверхность.

Потенциальный экономический эффект от внедрения рекомендованного режима складывается из сокращения времени выращивания (в 8 раз по сравнению с традиционной технологией), увеличения оборачиваемости тепличных площадей (до 3 циклов в год) и снижения затрат на электроэнергию за счет использования энергоэффективных светодиодов (40 Вт на один светильник).

Исследование проводилось в рамках гранта РНФ соглашение № 25–26–00679 от 17 февраля 2026 г. «Научно-обоснованное применение светодиодного освещения для выращивания посадочного материала быстрорастущих древесных пород тополя и березы, размноженных по технологии in vitro”.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анели, Н.А. Атлас эпидермы листа / Н.А. Анели. – Тбилиси : Мецниереба, 1975. – 105 с.
2. Войцеховская, О.В. Фитохромы и другие (фото) рецепторы информации у растений / О.В. Войцеховская // Физиология растений. – 2019. – Т. 66, № 3. – С. 163–177.
3. Закурин, А.О. Светокультура растениеводства защищенного грунта: фотосинтез, фотоморфогенез и перспективы применения светодиодов / А.О. Закурин, А.В. Щенникова, А.М. Камионская // Физиология растений. – 2020. – Т. 67, № 3. – С. 246–258.
4. Куделина, Т.Н. Особенности формирования фотосинтетического аппарата микроклонов *Populus tremula* L. и *Betula pendula* Roth. при LED-освещении различного спектрального состава / Т.Н. Куделина, А.В. Константинов, Л.В. Обуховская [и др.] // Известия НАН Беларуси. Сер. биол. наук. – 2019. – Т. 64, № 4. – С. 456–466.
5. Протасова, Н.Н. Фотосинтез и рост высших растений, их взаимосвязь и корреляции / Н.Н. Протасова, В.И. Кефели. – М. : Наука, 1982. – 251 с.
6. Bunn, S.M. Leaf−level productivity traits in *Populus* grown in short rotation coppice for biomass energy / S.M. Bunn, A.M. Rae, C.S. Herbert [et al.] // Forestry. – 2004. – V. 77. – P. 307–323.
7. Demotes-Mainard, S. Plant responses to red and far-red lights, applications in horticulture / S. Demotes-Mainard, Th. Peron, A. Corot [et al.] // Environ. Exp. Bot. – 2016. – V. 121. – P. 4–21.
8. Li, Y. Effects of red and blue light on leaf anatomy, CO_2 assimilation and the photosynthetic electron transport capacity of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) seedlings / Y. Li, G. Xin, Ch. Liu [et al.] // BMC Plant Biol. – 2020. – V. 20. – P. 1–16.
9. Light emitting diodes for agriculture / ed. by S. Dutta Gupta. – Singapore : Springer Nature, 2017. – 334 p.
10. Naznin, M.T. Blue light added with red LEDs enhance growth characteristics, pigments content,

and antioxidant capacity in lettuce, spinach, kale, basil, and sweet pepper / M.T. Naznin, M. Lefsrud, V. Gravel [et al.] // Plants. – 2019. – V. 8, № 4. – P. 93.

11. Pillitteri, L.J. Mechanisms of stomatal development / L.J. Pillitteri, K.U. Torii // Annu. Rev. Plant Biol. – 2012. – V. 63. – P. 591–614.
12. Silvestri, C. Influence of continuous spectrum light on morphological traits and leaf anatomy of hazelnut plantlets / C. Silvestri, M.E. Caceres, M. Ceccarelli [et al.] // Front. Plant Sci. – 2019. – V. 10. – P. 1318.
13. Wheeler, R.M. A historical background of plant lighting: an introduction to the workshop / R.M. Wheeler // HortScience. – 2008. – V. 43, № 7. – P. 1942–1943.
14. Zhen, S. Far-red light is needed for efficient photochemistry and photosynthesis / S. Zhen, M.W. van Iersel // J. Plant Physiol. – 2017. – V. 209. – P. 115–122.

REFERENCES

1. Aneli N.A. Atlas of the leaf epidermis. Tbilisi, Metzniereba, 1975, 105 p. (In Russian).
2. Voitsehovskaya O.V. Phytochromes and other (photo) information receptors in plants. *Plant Physiology [Fiziologiya rastenij],* 2019, no. 66 (3), pp. 163–177. (In Russian).
3. Zakurin A.O., Shchennikova A.V., Kamionskaya A.M. Light culture of protected ground plant growing: photosynthesis, photomorphogenesis and prospects for the use of LEDs. *Plant Physiology* [*Fiziologiya rastenij]*, 2020, no. 67 (3), pp. 246–258. (In Russian).
4. Kudelina T.N., Konstantinov A.V., Obukhovskaya L.V., Molchan O.V. Features of the formation of the photosynthetic apparatus of microclones of *Populus tremula* L. and *Betula pendula* Roth. under LED lighting of different spectral composition. *Bulletin of the NAS of Belarus. Series of biol. sciences [Izvestiya NAN Belarusi. Ser. biol. Nauk]*, 2019, no. 64 (4). pp. 456–466. (In Russian).
5. Protasova N.N., Kefeli V.I. Photosynthesis and growth of higher plants, their interrelationships and correlations. Moscow, Science, 1982, 25 p. (In Russian).
6. Bunn S.M., Rae A.M., Herbert C.S., Taylor G. Leaf‑level productivity traits in *Populus* grown in short rotation coppice for biomass energy. *Forestry,* 2004, no. 77, pp. 307–323.
7. Demotes-Mainard S., Peron Th., Corot A., Bertheloot J., Le Gourrierec J., Pelleschi-Travier S., Crespel L., Morel Ph., Huche-Thelier L., Boumaza R., Vian A., Guerin V., Leduc N., Sakr S. Plant responses to red and far-red lights, applications in horticulture. *Environ. Exp. Bot*., 2016, no. 121, pp. 4–21.
8. Li Y., Xin G., Liu Ch., Shi Q., Yang F., Wei M. Effects of red and blue light on leaf anatomy, CO_2 assimilation and the photosynthetic electron transport capacity of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) seedlings. *BMC Plant Biol*., 2020, no. 20, pp. 1–16.
9. Light emitting diodes for agriculture. Ed. by S. Dutta Gupta. Singapore, Springer Nature, 2017, 334 p.
10. Naznin M.T., Lefsrud M., Gravel V., Azad M.O.K. Blue light added with red LEDs enhance growth characteristics, pigments content, and antioxidant capacity in lettuce, spinach, kale, basil, and sweet pepper. *Plants*, 2019, no. 8 (4), p. 93.
11. Pillitteri L.J., Torii K.U. Mechanisms of stomatal development. *Annu. Rev. Plant Biol*., 2012, no. 63, pp. 591–614.

12. Silvestri C., Caceres M.E., Ceccarelli M., Pica A.L., Rugini E., Cristofori V. Influence of continuous spectrum light on morphological traits and leaf anatomy of hazelnut plantlets. *Front. Plant Sci*., 2019, no. 10, p. 1318.
13. Wheeler R.M. A historical background of plant lighting: an introduction to the workshop. *HortScience*, 2008, no. 43 (7), pp. 1942–1943.
14. Zhen S., van Iersel M.W. Far-red light is needed for efficient photochemistry and photosynthesis. *J. Plant Physiol*., 2017, no. 209, pp. 115–122.

Статья поступила в редакцию 10.06.2026