

УДК 630*232.329.9

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ
НА РОСТ И РАЗВИТИЕ СЕЯНЦЕВ ХВОЙНЫХ ПОРОД
С ЗАКРЫТОЙ КОРНЕВОЙ СИСТЕМОЙ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ
В КОНТРОЛИРУЕМЫХ УСЛОВИЯХ**

Носников В. В., Селищева О. А., Севрук Т. Д.

Учреждение образования «Белорусский государственный
технологический университет»
(г. Минск, Беларусь)

Исследовано влияние интенсивности, продолжительности и спектра искусственного освещения на рост сеянцев сосны обыкновенной и ели европейской. Установлено, что для сосны лучшая всхожесть наблюдается при высокой интенсивности и длительности освещения, для ели – при минимальной интенсивности ($100 \text{ } \mu\text{моль } \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) и максимальном фотопериоде (17 ч). Высокая интенсивность снижает высоту гипокотиля у обоих видов, но положительно влияет на развитие корневой системы. Наилучшую динамику всхожести показал вариант с комбинированным освещением белого и монохромного красного света, а также с обработкой семян красным светом. Дальний красный свет увеличивает высоту гипокотиля сосны в большей степени, чем ели. Максимальная высота и диаметр надземной части как сосны, так и ели достигается при использовании дальнего красного света и при переменной освещенности. Оптимальный режим для сеянцев с ЗКС: начальное освещение $80–100 \text{ } \mu\text{моль } \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 14 часов, с последующим увеличением до $160–200 \text{ } \mu\text{моль } \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, ель европейская, светодиодное освещение, биометрические показатели сеянцев.

**THE INFLUENCE OF LED LIGHTING PARAMETERS
ON THE GROWTH AND DEVELOPMENT OF CONIFEROUS SEEDLINGS
WITH A CLOSED ROOT SYSTEM WHEN GROWN
IN CONTROLLED CONDITIONS**

Nosnikov V. V., Selishcheva O. A., Sevruk T.D.

The effect of intensity, duration and spectrum of artificial lighting on early growth of Scots pine and European spruce seedlings was studied. It was found that for pine, the best germination was observed with high intensity and duration of lighting, for spruce – with minimum intensity ($100 \text{ } \mu\text{mol/m}^2\text{s}$) and maximum photoperiod (17 h). High intensity reduces the height of the hypocotyl in both species, but has a positive effect on the development of the root system. The best germination dynamics were demonstrated by the variant with combined illumination of white and monochrome

red light and also with seed treatment with red light. Far red light increases hypocotyl height in pine to a greater extent than in spruce. The maximum height and diameter of the aboveground part of pine and spruce is achieved using far red light, and with variable illumination. The optimal regime for seedlings in closed root systems: initial illumination of 80–100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 14 hours, with a subsequent increase to 160–200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Keywords: Scots pine, Norway spruce, LED lighting, seedling biometrics.

ВВЕДЕНИЕ

Применение посадочного материала с закрытой корневой системой (ЗКС) для воспроизводства и разведения лесов растет во всем мире. Доля лесных культур, созданных с его использованием, значительна: в Финляндии – почти 100%, Британской Колумбии – 76%, Швеции – 67%, Канаде – более 50%, Норвегии – 48%, США – 29%, Польше – более 20%, России – около 5%, Литве – 3% [1, 2]. В Беларуси сеянцы с ЗКС по технологии Пейперпот начали производить с 1977 года на базе Глубокского опытного лесхоза [3].

Современные технологии получения сеянцев с ЗКС включают этапы выращивания в теплице и на полях доращивания. Тепличный этап – самый дорогостоящий, поэтому в последнее время активно ведутся исследования по переходу от использования теплиц к выращиванию в полностью контролируемых условиях, которые подходят в том числе для круглогодичного выращивания посадочного материала [4, 5]. В основе технологии лежат кассеты (объем 3–15 cm^3), автоматизированные системы пересадки и искусственно освещение [5–7]. Освещение в этом случае играет ключевую роль: обеспечивает фотосинтез и влияет на развитие растений, поскольку они распознают интенсивность, продолжительность и спектр света [8–10]. Особое значение имеют синий, красный и дальний красный диапазоны, влияющие на рост и развитие растения [11–14]. Для стимуляции роста и одревеснения посадочного материала с закрытой корневой системой (ЗКС) также применяют изменение освещенности [15, 16].

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения влияния интенсивности и переменного освещения светодиодными светильниками на рост и развитие посадочного материала сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) и ели европейской (*Picea abies*) семена высевали в кассеты Plantek F100, которые помещали в световой бокс со светильниками марки LED FARM (производство ЦСОТ НАН Беларуси), обеспечивающими фитосвет с соотношением R/B равным 3. Эксперимент проводился в два этапа. На первом этапе использовалась интенсивность освещения 100 и 200 $\mu\text{моль m}^{-2} \text{s}^{-1}$ с фотопериодом 14 и 17 ч, показавшие лучшие результаты в предыдущих исследованиях [17]. Для дальнейшего доращивания и оценки роста в открытом грунте, кассеты с вариантами первого этапа опыта

в июле выносили на полигон и размещали на подставках. На втором этапе были заложены следующие варианты опыта:

1. Освещение $100\pm10 \text{ \mu mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 14-часовой фотопериод.
2. Освещение: $80\pm10 \text{ \mu mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 14-часовой фотопериод. В период активного роста эпикотиля увеличивали освещение до $160\pm10 \text{ \mu mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 17-часовой фотопериод.
3. Монохромное освещение менялось в зависимости от фазы развития: прорастание – монохромный красный свет; перед развертыванием хвои – дальний монохромный красный свет; начало роста хвои – фитосвет; заключительный этап – монохромный синий свет. Интенсивность: $200\pm10 \text{ \mu mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, фотопериод 17 часов.
4. Комбинированное освещение фитосветом и последовательно красным, дальним красным и синим светом с первоначальной интенсивностью $160 \text{ \mu mol/m}^2/\text{с}$ и последующим увеличением до $200 \text{ \mu mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ с фотопериодом 17 часов.
5. Семена сосны и ели обрабатывали красным светом, дальнейшее выращивание сеянцев при освещении $100\pm10 \text{ \mu mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, которое увеличивали до $200\pm10 \text{ \mu mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.
6. Освещение $100\pm10 \text{ \mu mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (фотопериод 17 ч) с увеличением до $200\pm10 \text{ \mu mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ в начале активного роста эпикотиля.
7. Освещение $60\pm10 \text{ \mu mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 17-часовой фотопериод.

Растения выращивались только в контролируемых условиях при температуре окружающего воздуха $24\pm2^\circ\text{C}$.

Оценка общего уровня освещенности, а также спектральных характеристик светодиодных источников света проводилась с использованием спектрометра PAR PG200N. Измерение диаметра у корневой шейки и высоты надземной части сеянцев проводилось у 50 растений с оценкой достоверности различий по t-критерию Стьюдента. Массы надземных и подземных частей растений определялись в абсолютно сухом состоянии у 5 растений со средним значением высоты и диаметра.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Интенсивность, продолжительность и спектр искусственного освещения влияют на рост сеянцев на ранних этапах. Понимание этого влияния позволяет контролировать параметры освещения для получения посадочного материала с заданными характеристиками.

При проведении эксперимента проводилась оценка сроков прорастания семян и наступления следующих фаз развития: 1 – прорастание семян; 2 – появление всходов; 3 – развертывание семядолей; 4 – появление почки зачаточного побега. Для оценки влияния и определения достоверности различий использовалось пять повторностей по 20 семян в каждой для каждого варианта опыта.

Динамика грунтовой всхожести семян сосны обыкновенной и ели европейской в зависимости от интенсивности освещения и его продолжительности приведена на рисунках 1 и 2 соответственно. На начальном этапе для сосны обыкновенной лучшая всхожесть семян наблюдалась при высокой интенсивности и длительности освещения. Для ели европейской оптимальной оказалась минимальная интенсивность (100 $\mu\text{моль}/\text{м}^2\text{с}$) и максимальный фотопериод (17 ч).

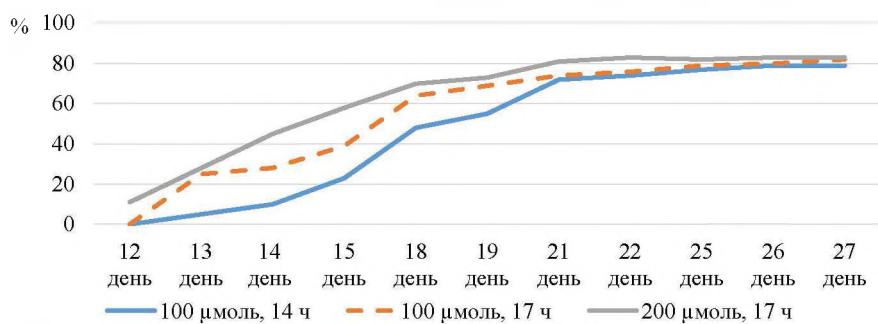


Рисунок 1 – Динамика всхожести семян сосны обыкновенной в зависимости от интенсивности и продолжительности освещения

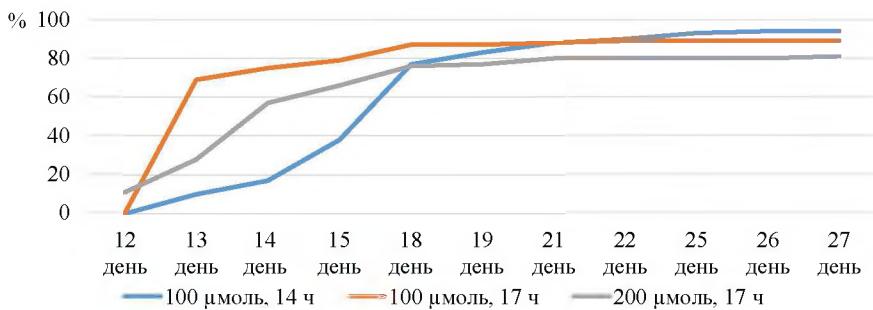


Рисунок 2 – Динамика всхожести семян ели европейской в зависимости от интенсивности и продолжительности освещения

Динамика развертывания семядолей для сосны обыкновенной и ели европейской по дням учета приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Среднее количество всходов, развернувших семядоли, шт.

Вариант	Пара-метр	Дни учета						
		18	19	21	22	25	26	27
Сосна обыкновенная								
100 мкмоль, 14ч	M	0,00	0,00	0,00	1,40	7,80	10,60	12,20
	±m	—	—	—	0,93	1,11	0,93	0,97
100 мкмоль, 17 ч	M	0,00	0,00	0,60	2,20	9,20	11,40	13,60
	±m	—	—	0,60	0,66	0,66	0,75	0,60
200 мкмоль, 17ч	M	0,00	0,20	2,00	5,80	12,00	13,80	15,20
	±m	—	0,20	0,45	0,66	0,45	0,73	0,37
Ель европейская								
100 мкмоль, 14ч	M	0,00	0,00	3,20	7,80	17,20	17,60	18,00
	±m	—	—	1,07	0,58	0,58	0,75	0,63
100 мкмоль, 17 ч	M	0,00	0,40	6,00	11,20	16,80	17,20	17,40
	±m	—	0,24	0,63	0,86	0,73	0,73	0,87
200 мкмоль, 17ч	M	0,40	0,80	4,20	9,20	13,60	13,80	14,80
	±m	0,24	0,49	0,97	1,53	1,17	1,11	1,16

Динамика разворачивания семядолей имеет те же тенденции, что и прорастание семян. Сроки появления почек зачаточного побега также демонстрируют аналогичную тенденцию. Например, на 27-й день после посева среднее количество растений с появившимися почками у сосны обыкновенной при режимах освещения 100 мкмоль, 14 ч, 100 мкмоль, 17 ч и 200 мкмоль, 17 ч составило 1,8, 5,8 и 11,2, а у ели европейской – 6,4, 10,8 и 10,4 соответственно.

Изменение высоты гипокотиля всходов приведены на рисунках 3 и 4 соответственно.

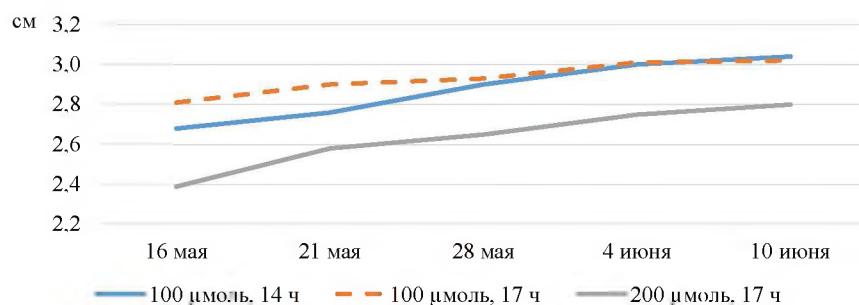


Рисунок 3 – Изменение высоты гипокотиля всходов сосны обыкновенной в зависимости от интенсивности и продолжительности освещения

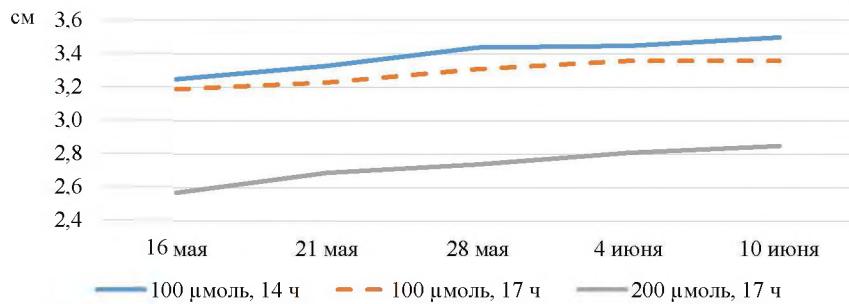


Рисунок 4 – Изменение высоты гипокотиля всходов ели европейской в зависимости от интенсивности и продолжительности освещения

При выращивании сосны обыкновенной и ели европейской в контролируемых условиях с использованием светодиодных светильников более высокая интенсивность освещения снижает высоту гипокотиля, в то время как продолжительность светового дня не оказывает значительного влияния. У всходов ели высота гипокотиля для вариантов с интенсивностью освещения 100 $\mu\text{моль м}^{-2} \text{с}^{-1}$ превосходила высоту гипокотиля сосны на 0,5 и 0,4 см соответственно. Для варианта с интенсивностью 200 $\mu\text{моль м}^{-2} \text{с}^{-1}$ высоты практически не отличались.

Результаты измерения подземной и надземной частей сеянцев сосны и ели через четыре месяца после посева приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики надземной и подземной частей сеянцев сосны обыкновенной и ели европейской по вариантам опыта

Вариант	Масса надземной части, г	Масса надземной части, г	Соотношение надземной и подземной частей	Среднее количество корней второго порядка, шт.	Среднее количество корней третьего порядка, шт.
Сосна обыкновенная					
100 мкмоль, 14ч	0.11	0.02	5.5	6.1	0
100 мкмоль, 17 ч	0.17	0.03	5.7	4.9	1,1
200 мкмоль, 17ч	0.28	0.06	4.7	10.3	7.4
Ель европейская					
100 мкмоль, 14ч	0.2	0.05	4.0	12.7	4.2
100 мкмоль, 17 ч	0.33	0.07	4.7	17.3	10.5
200 мкмоль, 17ч	0.66	0.14	4.7	14.6	31.4

Из таблицы 2 видно, что увеличение интенсивности искусственного освещения оказывает положительное влияние на развитие как надземной, так и подземной частей сеянцев, увеличивает развитость корневых систем, увеличивая количество корней второго и третьего порядка.

Результаты измерения высот сеянцев сосны обыкновенной и ели европейской после выноса их на поля доращивания приведены на рисунках 5 и 6 соответственно.

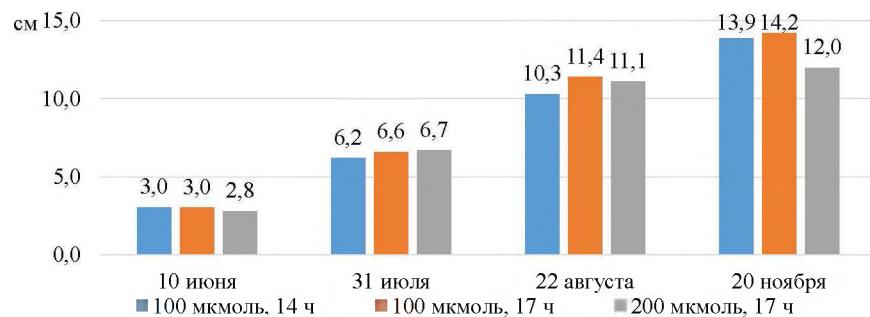


Рисунок 5 – Динамика высоты сеянцев сосны обыкновенной

Сеянцы сосны обыкновенной вариантов с максимальным фотопериодом показали интенсивный рост на начальном этапе, однако на конец вегетационного периода вариант с максимальными интенсивностью и продолжительностью фотопериода имел достоверно отличающуюся наименьшую высоту. Различия в высоте посадочного материала в зависимости от продолжительности фотопериода выявлено не было. Соответственно оптимальным режимом освещения для предварительного выращивания для сосны обыкновенной является интенсивность освещения 100 $\mu\text{моль}/\text{м}^2/\text{с}$, фотопериод 14 часов, который будет менее энергетически затратным по сравнению с фотопериодом 17 ч.

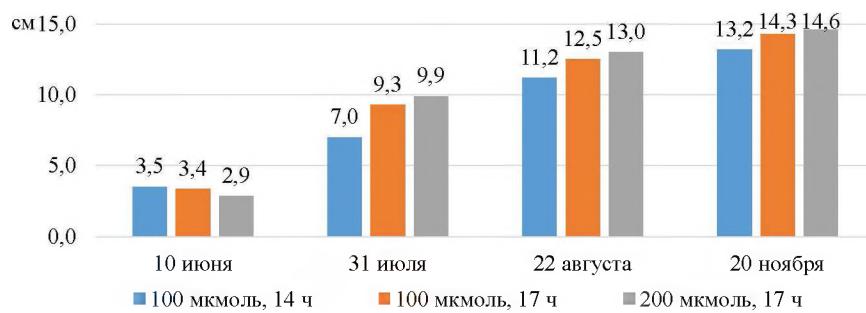


Рисунок 6 – Динамика высоты сеянцев ели европейской

Для ели европейской лучшими значениями роста в высоту обладал вариант с максимальной интенсивностью и продолжительностью освещения, который на момент выноса на поля доращивания характеризовался наименьшей высотой. В то же время разность по высоте на конец вегетации между вариантом с меньшей интенсивностью, но таким же фотопериодом была незначительной.

Сеянцы варианта с минимальной интенсивностью и продолжительностью освещения показали наихудший из трех вариантов результат, так как после выноса под прямые солнечные лучи оказались в условиях светового стресса, что выразилось в хлорозе хвои верхних частей побегов.

Биометрические показатели посадочного материала на конец вегетационного периода по вариантам опыта представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Биометрические показатели сеянцев сосны обыкновенной и ели европейской по вариантам опыта

Вариант	Высота надземной части, см $M \pm m$	Диаметр корневой шейки, мм $M \pm m$	Масса надземной части, г	Масса надземной части, г	Соотношение надземной и подземной частей	Процент сухой массы надземной части, %
Сосна обыкновенная						
100 $\mu\text{моль}$, 14 ч	13,9 \pm 0,39	2,44 \pm 0,07	1,14	0,46	2,49	34,1
100 $\mu\text{моль}$, 17 ч	14,2 \pm 0,52	2,26 \pm 0,09	1,29	0,33	3,96	36,7
200 $\mu\text{моль}$, 17 ч	12,0 \pm 0,73	2,38 \pm 0,08	0,97	0,35	2,82	38,3
Ель европейская						
100 $\mu\text{моль}$, 14 ч	13,2 \pm 0,50	1,92 \pm 0,08	0,52	0,32	1,63	38,2
100 $\mu\text{моль}$, 17 ч	14,3 \pm 0,69	2,08 \pm 0,08	0,79	0,35	2,23	38,5
200 $\mu\text{моль}$, 17 ч	14,6 \pm 0,66	2,39 \pm 0,07	1,27	0,62	2,06	56,8

Влияние интенсивности света на диаметр у сосны обыкновенной практически не происходит. В тоже время максимальная интенсивность освещения снижает массу надземной части растений. У ели европейской происходит рост диаметра и накопление как надземной, так и подземной массы сеянцев.

Также было отмечено, что закладка верхушечных почек наблюдалась прежде всего в вариантах с интенсивностью освещения 200 $\mu\text{моль}$. В этих вариантах на 22 августа количество сеянцев с почками у сосны обыкновенной было 28–37 %, у ели европейской 12–18 %. У остальных вариантов почки были в единичном количестве. На 20 ноября почки заложили все растения.

Основной задачей второй части исследований была апробация различных режимов освещения при выращивании посадочного материала с закрытой корневой системой, таких как использование освещения переменной интенсивности, спектральных характеристик, оценка возможности выращивания при низком уровне освещенности с целью экономии электроэнергии.

Динамика всхожести семян сосны обыкновенной и ели европейской по вариантам опыта приведена на рисунках 7 и 8 соответственно.

шт. 20

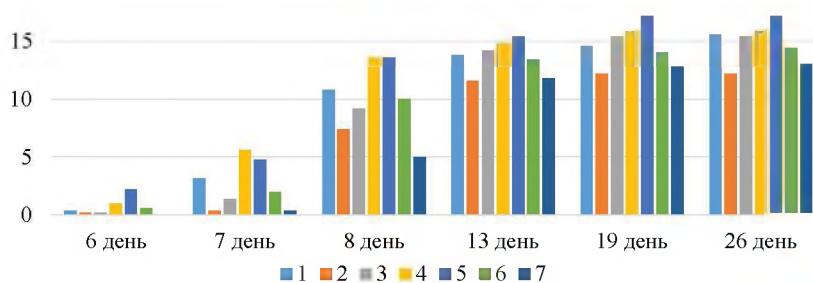


Рисунок 8 – Динамика всхожести семян сосны обыкновенной по вариантам опыта

Наилучшей динамикой всхожести семян сосны обыкновенной обладали варианты с комбинированным освещением на начальной стадии с добавлением красного света (вариант 4) и вариант с предварительной обработкой семян красным светом (вариант 5). Вариант 3 с освещением на начальном этапе монохромным красным светом показал хуже результаты в первые дни прорастания семян, однако на последний день учета он практически сравнялся с вариантом 4 с комбинацией белого и красного света. Наихудшей динамикой обладали варианты с минимальной интенсивностью освещения (варианты 2 и 7).

шт. 20

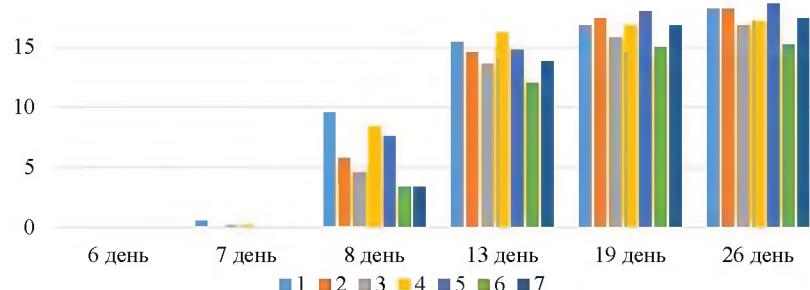


Рисунок 9 – Динамика всхожести семян ели европейской по вариантам опыта

Наилучшей динамикой всхожести семян ели европейской обладал вариант 1 с интенсивностью освещения 100 $\mu\text{моль}/\text{м}^2/\text{с}$ и фотопериодом 14 ч. Также хорошие результаты показало комбинированное использование белого и красного света (вариант 4) и предварительное облучение красным светом (вариант 5). Наихудшей динамикой обладал вариант 6 с первоначально высокой интенсивностью освещения. Скорость наступления фаз развертывания семядольной хвои и формирования почки зачаточного побега тесно связаны с процессами прорастания семян и показывает аналогичные тенденции.

Изменение высоты гипокотиля всходов сосны обыкновенной и ели европейской по вариантам опыта приведено на рисунках 9 и 10 соответственно.

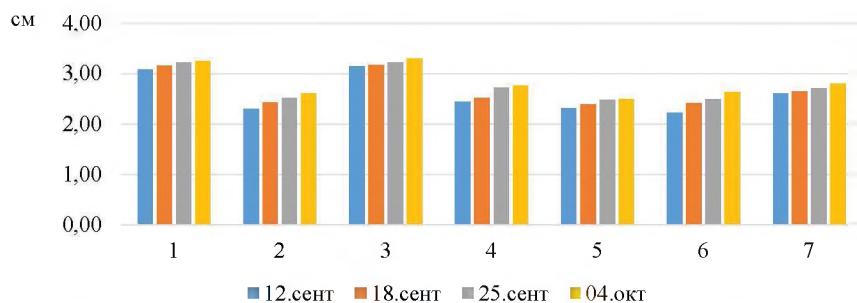


Рисунок 9 – Изменение высоты гипокотиля всходов сосны обыкновенной

Наибольшая высота гипокотиля всходов сосны обыкновенной наблюдалась в вариантах с дальним красным светом (вариант 3) и освещением интенсивностью 100 $\mu\text{моль}$ (вариант 1). Снижение интенсивности освещения (варианты 2 и 7) уменьшало высоту гипокотиля. Добавление дальнего красного света с общей высокой интенсивностью (вариант 4) повышает высоту гипокотиля по сравнению с вариантами 5 и 6, где используется только фитосвет высокой интенсивности. Таким образом интерес представляет совместное использование белого и дальнего красного света с общей интенсивностью 100 $\mu\text{моль}$.

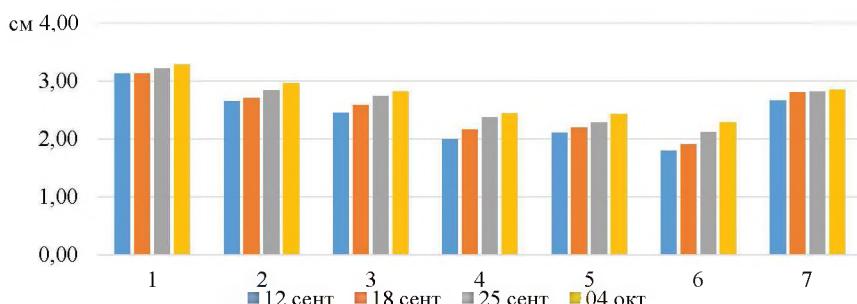


Рисунок 10 – Изменение высоты гипокотиля всходов ели европейской

Для ели европейской наибольшей высотой гипокотиля обладал вариант 1, где использовалось освещение с интенсивностью 100 $\mu\text{моль}/\text{м}^2/\text{с}$. Высокими показателями также характеризовались варианты 2 и 7. Использование монохромного дальнего красного света оказало незначительное влияние. Использование освещения высокой интенсивности (варианты 4, 5, 6) показали самые худшие показатели по высоте гипокотиля.

Биометрические показатели сеянцев сосны обыкновенной и ели европейской по вариантам опыта на конец вегетации приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Биометрические показатели сеянцев сосны обыкновенной и ели европейской по вариантам опыта

Вариант	Высота надземной части, см $M \pm m$	Диаметр корневой шейки, мм $M \pm m$	Масса надземной части, г	Масса надземной части, г	Соотношение надземной и подземной частей	Содержание сухой массы надземной части, %
Сосна обыкновенная						
1. 100 $\mu\text{моль}$, 14 ч	4,8 \pm 0,18	0,93 \pm 0,06	0,126	0,010	12,6	33,9
2. 80/160 $\mu\text{моль}$, 14/17 ч	5,2 \pm 0,20	1,21 \pm 0,08	0,254	0,038	6,7	26,8
3. 200 $\mu\text{моль}$, 17 ч моно	5,3 \pm 0,19	0,81 \pm 0,07	0,072	0,010	7,2	25,4
4. 160/200 $\mu\text{моль}$, 17 ч комб	5,3 \pm 0,17	0,93 \pm 0,06	0,208	0,030	6,9	28,0
5. 100/200 $\mu\text{моль}$, 17 ч красн	4,4 \pm 0,21	0,91 \pm 0,05	0,248	0,044	5,6	29,0
6. 100/200 $\mu\text{моль}$, 17 ч	5,0 \pm 0,20	0,92 \pm 0,08	0,208	0,034	6,1	24,3
7. 60 $\mu\text{моль}$, 17 ч	4,5 \pm 0,20	0,45 \pm 0,07	0,062	0,010	6,2	29,3
Ель европейская						
1. 100 $\mu\text{моль}$, 14 ч	8,3 \pm 0,20	1,05 \pm 0,07	0,220	0,038	5,8	26,1
2. 80/160 $\mu\text{моль}$, 14/17 ч	9,9 \pm 0,18	1,32 \pm 0,09	0,246	0,098	2,5	28,8
3. 200 $\mu\text{моль}$, 17 ч моно	8,6 \pm 0,21	0,87 \pm 0,08	0,134	0,022	6,1	25,3
4. 160/200 $\mu\text{моль}$, 17 ч комб	8,8 \pm 0,20	1,10 \pm 0,08	0,404	0,170	2,4	31,7
5. 100/200 $\mu\text{моль}$, 17 ч красн	9,4 \pm 0,21	1,11 \pm 0,09	0,488	0,184	2,7	30,1
6. 100/200 $\mu\text{моль}$, 17 ч	10,7 \pm 0,22	0,97 \pm 0,07	0,446	0,114	3,9	24,1
7. 60 $\mu\text{моль}$, 17 ч	8,0 \pm 0,19	0,52 \pm 0,06	0,152	0,040	3,8	25,2

Следует учитывать, что растения данного варианта исследований выращивались только в контролируемых условиях с ограниченным использованием удобрений для того, чтобы определить воздействие именно различных режимов освещения на посадочный материал сосны обыкновенной и ели европейской.

Таким образом, для сосны обыкновенной максимальная высота надземной части достигается при использовании дальнего красного света (варианты 3

и 4), максимальный диаметр – при переменной освещенности (вариант 2). Несмотря на то, что вариант 5 с предварительной обработкой семян красным светом показал один из худших вариантов по высоте, растения данного варианта обладали наибольшей массой надземной и подземной частей, а также показывали наилучшее соотношение надземной и подземной частей растений. Процессы одревеснения побегов происходят преимущественно у вариантов с интенсивным освещением (вариант 4 и 5), а также с самой низкой интенсивностью освещения (вариант 7) и самым коротким фотопериодом (вариант 1). Закладка верхушечных почек характерна преимущественно для вариантов с высокой интенсивностью освещения (вариант 2, 4 и 5).

У ели европейской максимальной высотой характеризуется вариант 2 и 6 с переменной интенсивностью, а также, вариант 5 с предварительной обработкой семян красным светом. Максимальное значение диаметра имели варианты 2 и 6, а также 4 и 5, характеризующиеся максимальной интенсивностью освещения. Максимальную массу надземной и подземной частей имел вариант 5 с предварительной обработкой семян. В целом у ели европейской наблюдается лучшее развитие корневых систем по сравнению с сосной обыкновенной. Наибольший процент сухой массы у ели характерен для вариантов с максимальной интенсивностью освещения, на момент окончательного учета растения ели европейской не сформировали верхушечные почки ни в одном из вариантов.

Таким образом, наиболее оптимальным вариантом использования светодиодного освещения для получения сеянцев с ЗКС в контролируемых условиях как для сосны обыкновенной, так и для ели европейской является использование первоначального освещения с интенсивностью 80–100 $\mu\text{моль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и фотопериодом 14 часов с последующим увеличением интенсивности до 160–200 $\mu\text{моль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Влияние освещения на прорастание и развитие сеянцев сосны обыкновенной и ели европейской в контролируемых условиях показало, что для прорастания семян сосны обыкновенной оптимальны высокая интенсивность и продолжительность освещения (200 $\mu\text{моль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и 17 ч), для ели – 100 $\mu\text{моль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и 17-часовой фотопериод.

Высокая интенсивность освещения снижает высоту гипокотиля у обоих видов. В тоже время интенсивное освещение положительно влияет на развитие надземной и в особенности подземной частей сеянцев.

Интенсивное светодиодное освещение (200 $\mu\text{моль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$) способствует более быстрой закладке верхушечных почек при выносе посадочного материала на поля дорапицания.

При выращивания в контролируемых условиях с использованием постоянного света оптимальным для сосны является освещение с интенсивностью потока фотонов 100 $\mu\text{моль/м}^2/\text{с}$ и фотопериодом 14 часов, для ели – 200 $\mu\text{моль/м}^2/\text{с}$ и 17 часов соответственно.

Комбинированное освещение (красный + фитосвет) и предварительная обработка семян красным светом улучшают всхожесть семян как сосны, так и ели. Также наилучшей динамикой всхожести у ели обладали варианты с интенсивностью освещения 100 $\mu\text{моль}/\text{м}^2/\text{с}$.

Наибольшая высота гипокотиля у всходов сосны обыкновенной наблюдалась при освещении дальним красным светом и при интенсивности 100 $\mu\text{моль}/\text{м}^2/\text{с}$. Последний вариант был также оптимальным для ели европейской.

Однако, высота гипокотиля не всегда приводит к максимальной высоте сеянцев, поскольку при разных режимах освещения изменяется рост эпикотильной части. Ограничение освещения на этапе формирования всхода с последующим увеличением ее интенсивности и продолжительности на этапе роста эпикотиля растения позволит повысить биометрические показатели посадочного материала. Изменение спектрального состава фитосвета оказывает влияние на развитие сеянцев сосны и ели, однако в использованных при исследованиях режимах оно не приводит к существенному повышению размерных характеристик, при этом усложняет техническую и технологическую составляющую процесса выращивания лесного посадочного материала в контролируемых условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Отраслевая программа по выращиванию посадочного материала с закрытой корневой системой в организациях Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь на период до 2020 года // Лесное и охотничье хозяйство. – 2014. – № 6. – С. 17–30.
2. *Forest Nursery Seedling Production in the United States*—Fiscal Year 2022 // Tree Planters' Notes. – 2022. – Vol. 66, № 2 – P. 73–80.
3. Якимов Н. И., Гвоздев В. К., Носников В. В. Лесные культуры и защитное лесоразведение : учеб. пособие для студ. вузов по спец. «Лесное хозяйство»: в 2 ч. Ч. 1. – Минск: БГТУ, 2019. – 145 с.
4. Mattsson A., Radoglou K., Kostopoulou P., Bellarosa R., Simeone M. C., Schirone B. Use of innovative technology for the production of high-quality forest regeneration materials // Scandinavian Journal of Forest Research. – 2010. – P. 1–9.
5. Hassan M. K., Kataja R., Pappinen A. State-of-the art and business development of a tree seedling nursery: A guidebook on advanced forest nursery management. Joensuu: University of Eastern Finland, 2024. – 180 p.
6. Radoglou K., Kostopoulou P., Raftoyannis Y., Dini-Papanastasi O., Spyroglou G. The physiological and morphological quality of *Pinus brutia* container seedlings produced from mini-plug transplants // Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology. – 2011. – Vol. 145. – P. 216–223.
7. Szabla K., Pabian R. Szkółkarstwo kontenerowe. – Warszawa: LP, 2009. – 250 s.

8. Luoranen J., Saksu T., Lappi J. Seedling, planting site and weather factors affecting the success of autumn plantings in Norway spruce and Scots pine seedlings // For. Ecol. Manag. – 2018. – P. 419–420.
9. Urban L., Restrepo-Diaz H. Influences of Abiotic Factors in Growth and Development // Ref. Modul. Life Sci. – 2009. – № 29. – P. 1330–1340.
10. Velasco M., Mattsson A. Light quality and intensity of light-emitting diodes during pre-cultivation of *Picea abies* (L.) Karst. and *Pinus sylvestris* L. seedlings – impact on growth performance, seedling quality and energy consumption // Scandinavian Journal of Forest Research. – 2019. – № 34:3. – P. 159–177.
11. Shibayev P., Pergolizzi R. The effect of circularly polarized light on the growth of plants // International Journal of Botany. – 2011. – Vol. 7. – P. 113–117.
12. Картаплов А.В., Пашковский П.П., Иванов Ю.В. Морфогенез ассимилирующих органов сеянцев сосны обыкновенной и ели европейской при действии красного и синего света // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2014. – № 1 (25). – С. 167–182.
13. Козина Л.В., Титова М.С., Иващенко Е.А., Резинкина Г.А., Каравес В.Е., Мирочник А.Г. Ростовые и фотосинтетические процессы саженцев хвойных пород под флуоресцентными пленками // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 3. – С. 18–24.
14. Pashkovskiy P. [and etc.] Influence of Light of Different Spectral Compositions on the Growth, Photosynthesis, and Expression of Light-Dependent Genes of Scots Pine Seedlings // Cells. – 2021. – № 24. – С. 1–14.
15. Tikkinen M., Riikonen J., Luoranen J. Covering Norway spruce container seedlings with reflective shading cloth during field storage affects seedling post-planting growth // New Forests. – 2022. – Vol. 53. – P. 627–642.
16. Heiskanen J. Effects of pre- and post-planting shading on growth of container Norway spruce seedlings // New Forests. – 2004. – Vol. 27. – P. 101–114.
17. Носников В. В., Босовец М. М., Селищева О. А., Баркун М. И. Влияние интенсивности светодиодного освещения на особенности развития сеянцев сосны и ели с закрытой корневой системой // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. – 2023. – № 2 (276). – С. 36–45.

Статья поступила в редакционный колледиум 07.05.2025 г.

