

УДК 630*232

В. В. Носников¹, М. М. Босовец¹, О. А. Селищева¹, М. И. Баркун²¹Белорусский государственный технологический университет²Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий

Национальной академии наук Беларуси

**ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ
НА ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ СЕЯНЦЕВ СОСНЫ И ЕЛИ
С ЗАКРЫТОЙ КОРНЕВОЙ СИСТЕМОЙ**

В статье приведены результаты исследования влияния интенсивности светодиодного освещения на фазы развития и рост сеянцев сосны обыкновенной и ели европейской с закрытой корневой системой. Исследования проводились при трех уровнях интенсивности освещения: 109, 221 и 307 мкмоль/м²/с. Выявлена зависимость интенсивности освещения и скорости наступления фаз развития сеянцев. Начало фазы раскрытия семядолей наступило на 12-й день для растений из секции со средней и высокой интенсивностью освещения и с 13-го дня для секции со слабым освещением. Фаза появления почки зачаточного побега фактически начинает хвоевую стадию развития сеянцев сосны и ели. Первые почки зачаточного побега у сосны обыкновенной начали появляться на 12-й день, а у ели европейской – на 13-й день. Фаза разворачивания настоящей хвои протекала практически параллельно с образованием почки зачаточного побега. Отставание составляло 1 день как для сосны обыкновенной, так и для ели европейской. Для обоих пород интенсивность разворачивания настоящей хвои значительно выше при средней и высокой интенсивности освещения по сравнению с низкой. При использовании фотопериода 13 ч наступило заложение верхушечных почек как у сосны, так и у ели. При увеличении продолжительности фотопериода на 1 ч активизировались ростовые процессы, что привело к увеличению высоты сеянцев в течение месяца для сосны на 43,4–67,3%, для ели на 5,2–28,4%.

Ключевые слова: освещение светодиодное, сосна обыкновенная, ель европейская, фазы развития.

Для цитирования: 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 хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 2 (276). С. 36–45. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-5.

V. V. Nosnikov¹, M. M. Bosovets¹, O. A. Selishcheva¹, M. I. Barkun²¹Belarusian State Technological University²Center of LED and Optoelectronic Technologies

of the National Academy of Sciences of Belarus

**INFLUENCE OF LED LIGHT INTENSITY ON THE DEVELOPMENT FEATURES
OF CONTAINERIZED PINE AND SPRUCE SEEDLINGS**

The article presents the results of the research of LED light intensity influence on the stages of development and growth of containerized seedlings of Scots pine and European spruce growing in a closed system. We used three levels of light intensity: 109, 221 and 307 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. A direct correlation between light intensity and the rate of phase onset was detected. The beginning of the phase of cotyledon opening occurred on day 12 for plants from the section with medium and high light intensity, and from day 13 for the section with low light intensity. The phase of bud emergence of an embryonic shoot actually begins the coniferous stage of development of pine and spruce seedlings. The first buds of an embryonic shoot in Scots pine began to appear on day 12, and in European spruce – on day 13. The phase of deployment of true needles runs almost parallel to the formation of buds of an embryonic shoot. The lag is 1 day for both Scots pine and European spruce. For both species, intensity of true needles unfurling is significantly higher at medium and high light intensity compared to low light intensity. Using a photoperiod of 13 hours leads to the establishment of apical buds in both pine and spruce. When the duration of photoperiod was increased by 1 hour, the growth processes were activated, which led to an increase in the height of seedlings within a month for pine by 43.4–67.3%, and by 5.2–28.4% for spruce.

Keywords: LED lighting, Scots pine, European spruce, phases of development.

For citation: Nosnikov V. V., Bosovets M. M., Selishcheva O. A., Barkun M. I. Influence of LED light intensity on the development features of containerize pine and spruce seedlings. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 2 (270), pp. 36–45. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-5 (In Russian).

Введение. Успешность роста и развития лесных древесных растений напрямую зависит от получения необходимого количества солнечной радиации. Недостаток солнечного света приводит к изменению физиологических процессов, ограничению роста и появлению различного рода деформаций, что в целом негативно сказывается на качестве посадочного материала, в том числе с закрытой корневой системой. Однако переизбыток солнечной радиации также способен вызывать негативные явления в растениях, а в отдельных случаях приводить к некрозу тканей и даже гибели всего растения.

При выращивании в контролируемых условиях закрытого грунта особую важность приобретает интенсивность и качество искусственного освещения. От интенсивности излучения зависит не только качество продукции, но и экономическая составляющая процесса выращивания посадочного материала. Высокая интенсивность излучения может обеспечить высокие результаты, однако такой подход приведет к высоким затратам электроэнергии и не всегда оправдан. Соответственно, важным моментом является определение оптимальной интенсивности излучения, позволяющей достичь высокого качества посадочного материала при относительно невысоких затратах электроэнергии.

Основная часть. Растения чувствительны к различным аспектам света, таким как качество, количество, продолжительность и направление [1].

Интенсивность света также является ключевым фактором окружающей среды для развития растений, поскольку снижение фотосинтетически активной радиации (ФАР) напрямую влияет на фотосинтез и фотоморфогенез [2, 3]. Недостаточное освещение вызывает у растений ряд негативных процессов, приводящих к снижению ростовых процессов. В ходе эволюционного развития растения использовали различные адаптивные стратегии для уменьшения потенциального ущерба, вызванного как избыточным, так и недостаточным освещением.

Исследования показали, что растения могут уменьшить прямое поглощение световой энергии путем изменения морфологической и фотосинтетической пластичности, например с помощью уменьшения удельной массы листа, увеличения удельной площади листа или повышения способности использования света за счет снижения точки светового насыщения и нижней точки световой компенсации [4].

При исследовании интенсивности освещения в целом основной упор необходимо делать на количестве фотосинтетически активной радиации (ФАР), значение которой для искусственного освещения выражается через фотосинтетическую фотонную облученность (ФФО) в $\text{мкмоль}/\text{м}^2/\text{с}$. Эта единица описывает количество фотонов света в фотосинтетическом диапазоне волн (400–700 нм), которую площадь 1 м^2 получает в секунду.

Оценка возможной интенсивности искусственного освещения при выращивании лесного посадочного материала должна базироваться на оценке естественного освещения, формируемого солнечным светом с учетом географического расположения. Поступление солнечной радиации зависит не только от географического положения Беларуси и ее регионов, но и от продолжительности солнечного сияния, наличия облаков и т. д. Например, на севере Беларуси самый длинный день в 2,5 раза длиннее наиболее короткого, на юге – в 2,1 раза [5].

Что касается фотосинтетической фотонной облученности, то для 55° с. ш. максимальное ее значение приходится на июль и составляет приблизительно $700 \text{ мкмоль}/\text{м}^2/\text{с}$. Минимальным значением можно считать примерно $600 \text{ мкмоль}/\text{м}^2/\text{с}$ [6], которое соответствует марту. Во второй половине этого месяца можно начинать высеv первой ротации посадочного материала при использовании трехротационной схемы выращивания, которая используется, например, Республиканским лесным селекционно-семеноводческим центром.

Однако учитывать максимальные значения ФФО солнечного света для контролируемых условий не совсем правильно, поскольку растения могут успешно произрастать в широком диапазоне освещенностей, особенно это касается лесных древесных растений. Они приспособлены для произрастания под пологом материнского древостоя и выносят иногда достаточно сильное затенение, особенно на начальном периоде роста и развития. Более того, древесные растения, относящиеся к группе теневыносливых, к которым принадлежит ель европейская, оказываются чувствительны к высокой интенсивности фотонного облучения, которая может вызывать хлороз у сеянцев [7]. Использование максимального значения ФФО помимо негативного воздействия на растения приведет к увеличенным затратам электроэнергии, что, соответственно, увеличит себестоимость выращивания посадочного материала.

Анализ зарубежного опыта исследования роста древесных растений под влиянием светодиодного освещения показал, что успешно выращивать их можно при интенсивности фотонного облучения в районе $200 \text{ мкмоль/м}^2/\text{с}$.

Например, при выращивании черешни и кизила турецкими учеными использовались светодиодные светильники с интенсивностью фотосинтетического облучения $200 \pm 20 \text{ мкмоль/м}^2/\text{с}$ и фотопериодом 14 ч [8]. При оценке ламп с различным спектром они установили положительное влияние именно светодиодного освещения на морфологические характеристики растений.

Изучением влияния качества света и его интенсивности на рост сосны обыкновенной и ели европейской достаточно глубоко занимались в Швеции [7]. Исследование проводилось при интенсивности фотосинтетического излучения в диапазоне от 50 до $400 \text{ мкмоль/м}^2/\text{с}$. По данным ученых, не было обнаружено линейной зависимости между ростом деревьев и интенсивностью излучения. Однако для более теневыносливой ели европейской оптимальной интенсивностью считался диапазон от 100 до $200 \text{ мкмоль/м}^2/\text{с}$. Для светолюбивой сосны обыкновенной оптимум составлял около $200 \text{ мкмоль/м}^2/\text{с}$. При меньшей интенсивности излучения происходило удлинение побегов, однако существенных изменений диаметра не обнаруживалось. При большей интенсивности увеличивалась сухая масса растений, но не было заметно влияния на корневые системы. В то же время при максимальной интенсивности $400 \text{ мкмоль/м}^2/\text{с}$ наблюдалось пожелтение хвои как для сосны обыкновенной, так и для ели европейской. Измерение флуоресценции хлорофилла показало уменьшение данного пигмента с увеличением интенсивности излучения, причем для ели европейской минимум наблюдался уже при $200 \text{ мкмоль/м}^2/\text{с}$, для сосны обыкновенной – при $400 \text{ мкмоль/м}^2/\text{с}$.

Китайские и шведские ученые в кооперации для оценки влияния монохроматического света использовали интенсивность фотосинтетического облучения $50 \text{ мкмоль/м}^2/\text{с}$ [9].

Российские ученые проводили выращивание семян сосны обыкновенной при интенсивности ФФО $130 \pm 10 \text{ мкмоль/м}^2/\text{с}$ с использованием как флуоресцентных ламп, так и светодиодных [10]. Они установили, что недостаток определенных частей спектра негативно влияет на рост сосны, относящейся к группе светолюбивых.

Помимо интенсивности фотонного облучения важную роль в жизни растений играет продолжительность фотопериода – промежутка, в течение которого будет включен источник освещения [11, 12]. Недостаточная продолжительность фотопериода может вызывать ускоренное

наступление состояния покоя растений [13]. Это свойство активно используется для стимулирования процессов подготовки к зимнему хранению посадочного материала с закрытой корневой системой за счет активации соответствующих генов [14, 15]. Увеличенная продолжительность фотопериода при использовании искусственного освещения приведет, как минимум, к перерасходу электроэнергии.

При выборе продолжительности фотопериода для проведения исследований мы ориентировались на длину светового дня конца марта – начала апреля, которая составляла 13 ч. В специализированных комплексах по выращиванию посадочного материала с закрытой корневой системой высева первой ротации ели европейской может начинаться с середины марта. С учетом того, что семена прорастают в конце марта – начале апреля, то первая ротация посадочного материала с ЗКС вступает в фазу развертывания семядолей и становится фотосинтетически активной [16]. Этот период характеризуется достаточно напряженным для растений световым режимом, вызванным коротким световым днем и низкой интенсивностью солнечного света. Так, например, при наблюдении за ростом и развитием посадочного материала с закрытой корневой системой первой ротации в условиях Республиканского лесного селекционно-семеноводческого центра в апреле была обнаружена остановка в росте растений ели европейской, которая продолжалась в течение 3–4 недель и более. У растений сосны обыкновенной задержка в росте так явно, как у семян ели европейской, не наблюдалась.

Таким образом, для проведения исследования в условиях закрытой системы, приближенных к естественным условиям освещения Минской области для семян первой ротации, интерес представляет диапазон ФФО от 100 до $500 \text{ мкмоль/м}^2/\text{с}$ с фотопериодом, равным 13 ч.

Для определения особенностей развития семян сосны и ели определялись сроки и скорости наступления фенологических фаз, среди которых выделялись следующие [17]: 1 – прорастание семян; 2 – появление всходов; 3 – развертывание семядолей; 4 – появление почки зачаточного побега; 5 – развертывания хвои; 6 – рост эпикотильной части стволика; 7 – переход в состояние покоя.

Семена сосны обыкновенной и ели европейской для проведения исследований были получены в Республиканском лесном селекционно-семеноводческом центре и характеризовались первым классом качества. Место сбора семян – центральная часть Республики Беларусь. Высев осуществлялся 15 марта 2022 г. в кассеты Plantek 100F с объемом ячейки 85 см^3 .

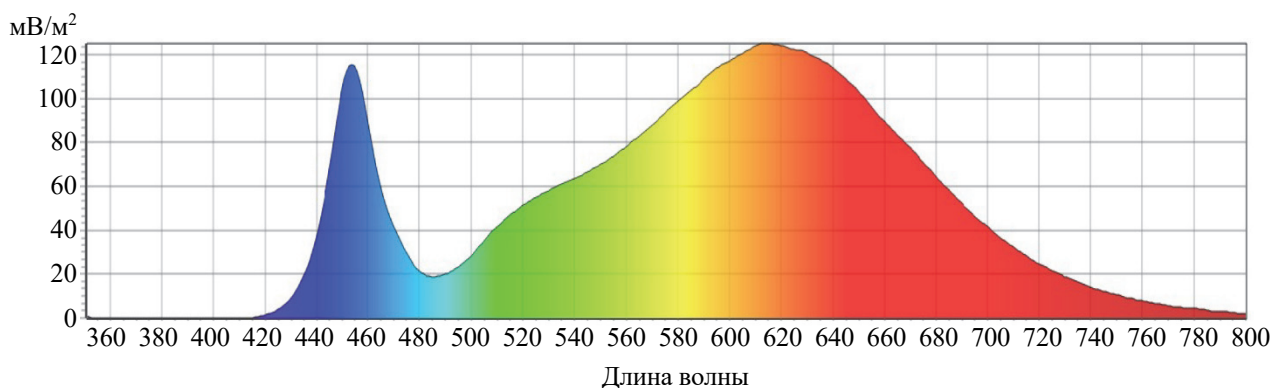


Рис. 1. Распределение облученности для секции № 1

Для заполнения кассет использовался субстрат, приготовленный согласно технологии, описанной в ТУ ВУ 100061961.002-2015 для сосны и ели.

С момента формирования настоящей хвои осуществлялась подкормка растений 0,5% раствором удобрения Кристалон особых.

Подкормка проводилась в объеме 10–12 мл на каждую ячейку с интервалом 1 неделя. По мере надобности осуществлялся полив в такой же дозировке. Контроль необходимости полива велся весовым методом.

Высеянные кассеты помещались в световой бокс из расчета одна кассета на одну секцию бокса.

Для создания необходимого уровня освещения в боксе использовались светодиодные светильники марки ДДП06-4x8-004 УХЛ4 Home Farm производства РНПУП «ЦСОТ НАН Беларуси». Они предназначены для использования в качестве источника ФАР при выращивании рассады, зеленных, лекарственных и декоративных растений в домашних условиях.

Светильники устанавливались таким образом, чтобы в первой секции обеспечивалась средняя фотонная облученность на уровне 100, во второй – 200 и в третьей 300 мкмоль/м²/с. Каждая секция бокса закрывалась с четырех сторон пластиковыми панелями белого цвета для обеспечения равномерного освещения.

Оценка общего уровня освещенности, а также спектральных характеристик светодиодных источников света проводилась с использованием спектрометра PAR PG200N.

Диаграмма распределения облученности в зависимости от длины волны представлена на рис. 1.

Спектральный состав излучения для всех трех секций идентичен. Значения фотонной облученности посева по основным диапазонам длины волны для каждой из секций в центральной области приведены в таблице.

В процессе проведения исследований в каждой секции учитывалось количество растений, достигших определенной фазы своего развития.

Динамика появления всходов представлена на рис. 2 и 3.

Появление единичных всходов началось на седьмой день как у сосны обыкновенной, так и у ели европейской.

Сравнение ФАР в зависимости от длины волны (мкмоль/м²/с)

| Длина волны | Номер секции | | |
|---------------------|--------------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 |
| PFD (общее) | 106,8 | 220,0 | 312,5 |
| PFD-B (400–500 нм) | 50,6 | 104,9 | 147,7 |
| PFD-G (500–600 нм) | 34,6 | 71,1 | 101,4 |
| PFD-R (600–700 нм) | 13,1 | 26,4 | 38,7 |
| PFD-FR (700–800 нм) | 8,5 | 17,6 | 24,8 |

На восьмой день было уже четко видно заметное отставание по количеству появившихся проростков в секции с наименьшей интенсивностью освещения. Для сосны обыкновенной количество появившихся растений для среднего и высокого уровня интенсивности было примерно одинаковым, для ели более интенсивное освещение позволило повысить этот уровень на 5%.

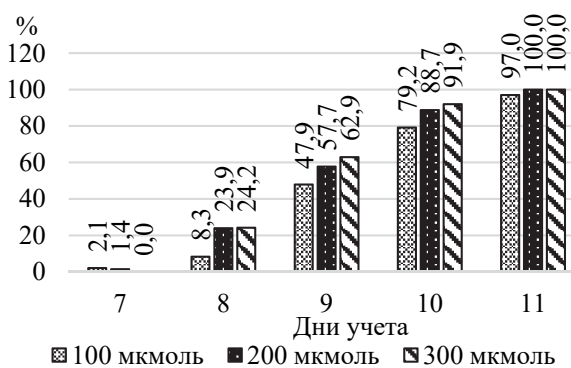


Рис. 2. Динамика появления всходов сосны обыкновенной

В дальнейшем для сосны обыкновенной более высокая скорость появления всходов была характерна для секции с большей интенсивностью потока фотонов. Для ели эта закономерность наблюдалась в первой половине периода

прорастания. Процесс появления всходов закончился на 11-й день для сосны обыкновенной и на 12-й день для ели европейской.

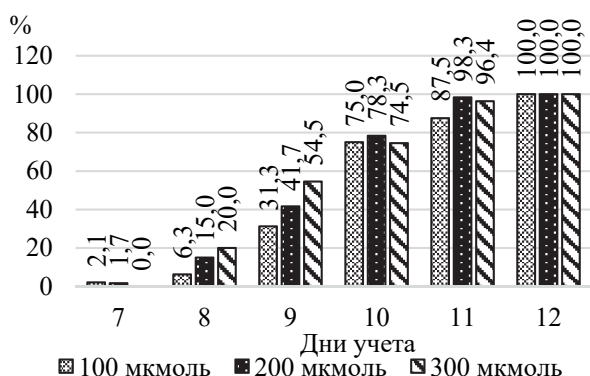


Рис. 3. Динамика появления всходов ели европейской

Динамика раскрытия семядолей представлена на рис. 4, 5.

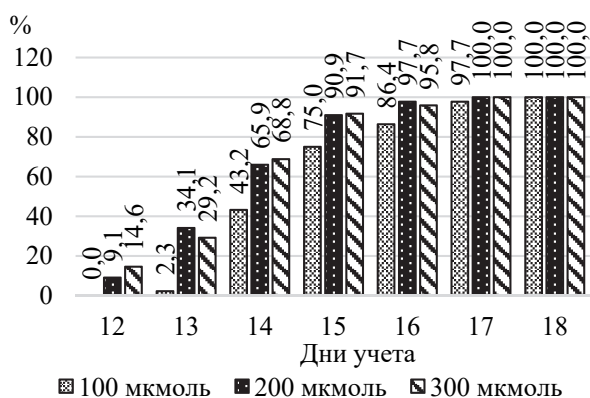


Рис. 4. Динамика раскрытия семядолей сосны обыкновенной

Для средней и высокой интенсивности освещения процесс раскрытия семядолей протекал практически одинаково у сосны обыкновенной. Для ели европейской увеличение степени освещенности вызвало ускорение процесса. Фактически интенсивность образования почки в случае высокой интенсивности освещения такая же, как

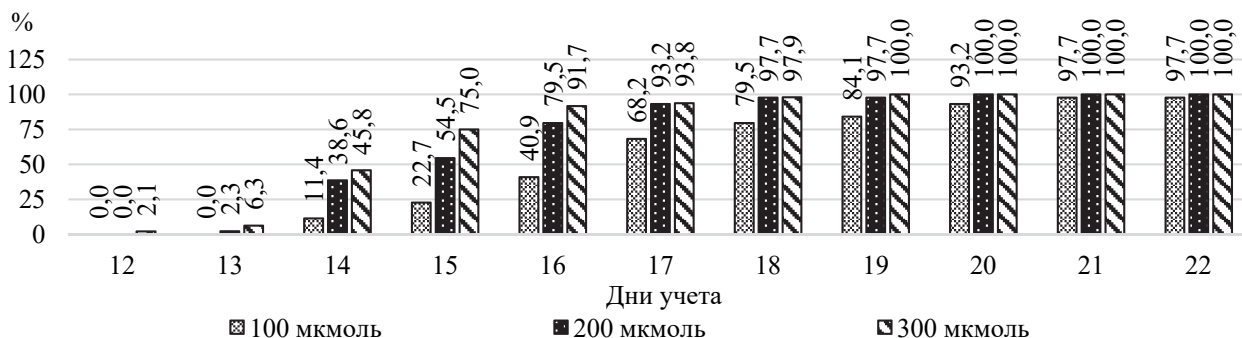


Рис. 6. Динамика появления почки зачаточного побега сосны обыкновенной

и для сосны, однако для средней и слабой интенсивности процесс продолжался до 23-го дня.

Окончание фазы раскрытия семядолей наступило на 17-й день как у сосны обыкновенной, так и у ели европейской.

Фаза появления почки зачаточного побега фактически начинает хвоевую стадию развития семян сосны и ели. С этого момента образуются зачатки настоящей хвои, которая интенсивно участвует в фотосинтетической активности.

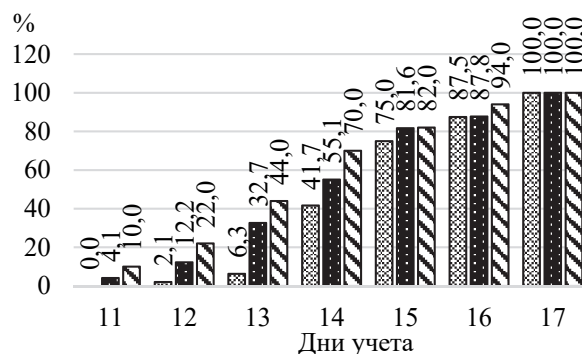


Рис. 5. Динамика раскрытия семядолей ели европейской

Первые почки зачаточного побега у сосны обыкновенной появились на 12-й день (рис. 6), а у ели европейской – на 13-й день (рис. 7). Причем интенсивность процесса появления почки зачаточного побега в значительной степени зависела от интенсивности освещения у сосны обыкновенной и в меньшей степени у ели европейской.

В первом случае максимальный уровень освещенности привел к увеличению скорости образования почек. Разница с минимальным уровнем составляла 2,2–4,0 раза. В результате фаза появления почки зачаточного побега для средней и высокой интенсивности практически закончилась на 19-й день, а для низкой интенсивности – только на 21-й день.

Для ели наблюдается такая же закономерность, однако разница в проценте появления почки зачаточного побега по вариантам опыта не настолько высокая.

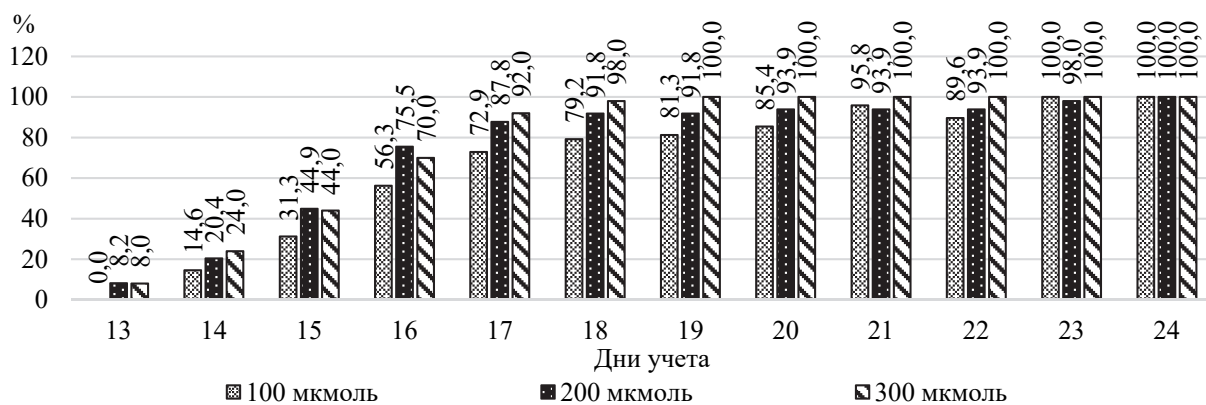


Рис. 7. Динамика появления почки зачаточного побега ели европейской

Фаза разворачивания настоящей хвои очень важна не только в физиологическом, но и технологическом аспекте. С момента появления настоящей хвои начинают формироваться боковые корни и сеянец переходит к автотрофному типу питания. Именно на эту фазу ориентируются специалисты при назначении даты начала подкормок, поскольку после достижения настоящей хвоей определенного размера

начинается рост эпикотиля и сеянца в высоту, что требует значительных объемов элементов питания.

Фаза разворачивания настоящей хвои у обеих пород протекает практически параллельно с образованием почки зачаточного побега. Отставание составляет один день как для сосны обыкновенной (рис. 8), так и для ели европейской (рис. 9).

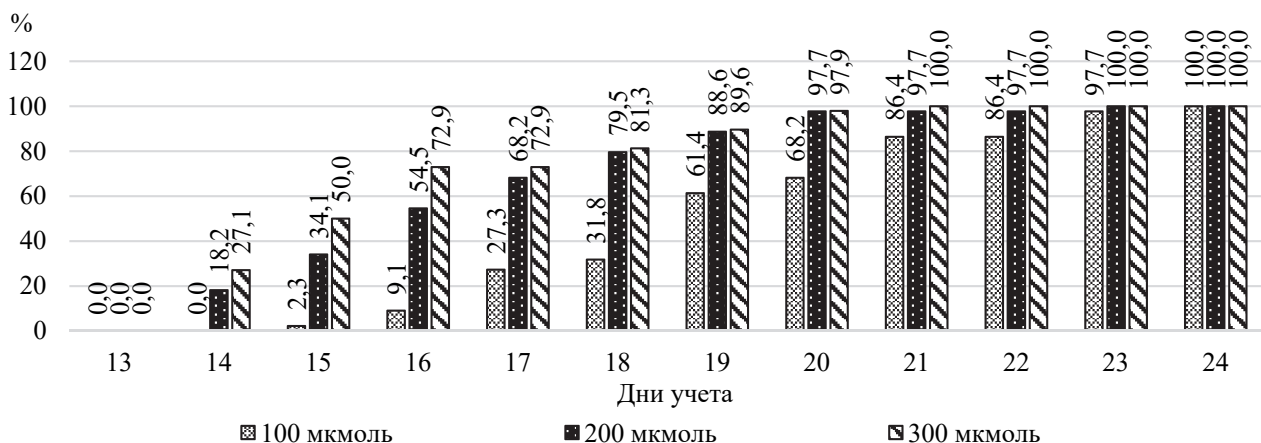


Рис. 8. Динамика разворачивания настоящей хвои сосны обыкновенной

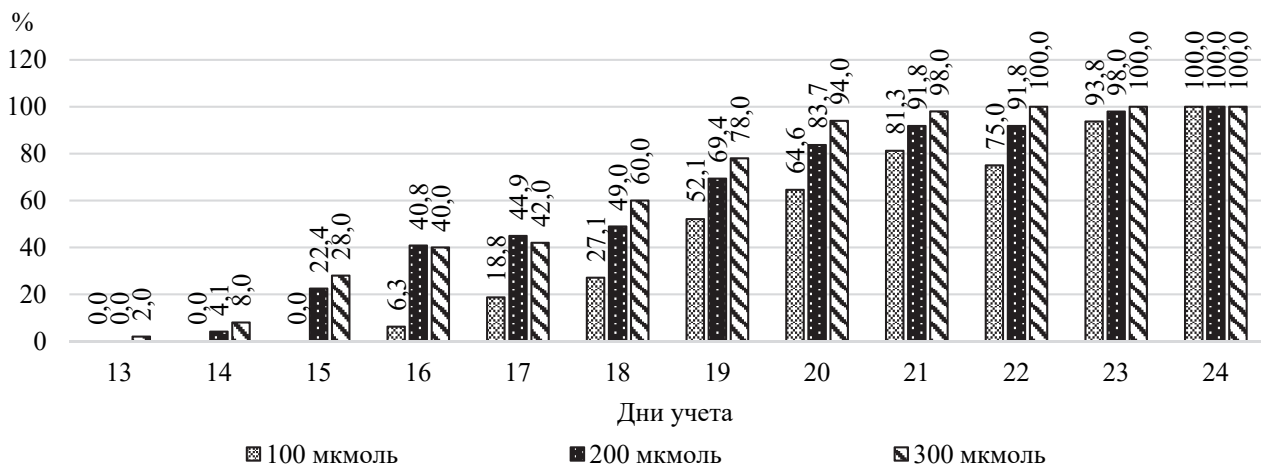


Рис. 9. Динамика разворачивания настоящей хвои ели европейской

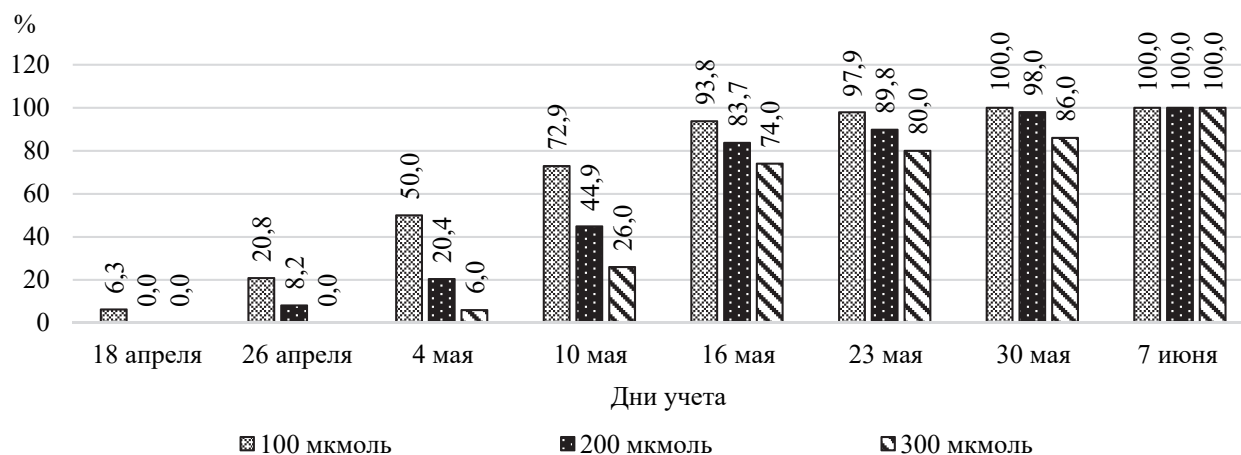


Рис. 10. Динамика образования верхушечных почек для ели европейской

Для обеих пород интенсивность развертывания настоящей хвои значительно выше при средней и высокой интенсивности освещения по сравнению с низкой.

При высокой интенсивности процесс развертывания хвои завершился на 21-й день для сосны и на 22-й день для ели. При средней интенсивности – на 23-й и 24-й день соответственно, при низкой – на 24-й день у обеих пород.

Наблюдение за ростовыми процессами показало, что до середины июня рост в высоту был незначительный у обеих пород. Кроме того, начиная с 18 апреля наблюдалось единичное формирование верхушечных почек, что фактически означает окончание фазы роста эпикотильной части стволика и переход растения в состояние покоя. Формирование верхушечной почки происходило вне зависимости от температуры, интенсивности подкормок и поливов и фактически было обусловлено продолжительностью фотопериода и количеством приходящей световой энергии. Причем характерно такое явление преимущественно для ели европейской. Сосна обыкновенная также начала закладывать верхушечные почки, однако этот процесс начался практически на месяц позже.

Динамика образования спящих почек для ели европейской приведена на рис. 10.

Как показано на рис. 10, наиболее интенсивно этот процесс протекал в секции с минимальной интенсивностью освещения. В этом варианте все растения заложили верхушечную почку фактически в течение 35 дней. Для наиболее освещенных растений данный процесс длился почти 50 дней. Освещенность в 221 мкмоль/м²/с занимает промежуточное положение.

Поскольку образование почек тормозило ростовые процессы, было принято решение увеличить продолжительность фотопериода до 14 ч, что было выполнено 17.06.2022. В результате практически через месяц высота семян сосны

обыкновенной, большинство из растений которой только начало закладывать верхушечные почки, увеличилась на 67% для первой секции, на 57,5% для второй и 43,4% для третьей. Для теневыносливой ели европейской увеличение периода не оказало такого сильного воздействия на прирост в высоту. Наиболее высокий прирост (28,4%) наблюдался в наиболее освещенной секции, наименьший прирост был характерен для секции с наименьшей интенсивностью освещения и составил 5,2%. В результате явная прямая зависимость высоты семян от интенсивности освещения, наблюдаемая в апреле, мае и июне, стала практически незаметной в июле.

Заключение. По степени влияния интенсивности освещения на формирование проростков, развертывание семядолей, образование почки зачаточного побега и развертывание настоящей хвои при уровне фотонной облученности 100 мкмоль/м²/с получены минимальные результаты. Отставание в сроках наступления фаз составляет 1–3 дня. При фотонной облученности в 200 и 300 мкмоль/м²/с получены сопоставимые результаты. С учетом меньшего потребления энергии уровень фотонной облученности 200 мкмоль/м²/с можно считать оптимальным значением для данных фаз развития и использовать его для выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой в условиях светодиодного освещения.

Продолжительность фотопериода 13 ч лимитирует ростовые процессы сосны обыкновенной и ели европейской и вызывает закладку верхушечной почки практически через 1 месяц после посева у ели европейской и 1,5–2 месяца у сосны обыкновенной. Увеличение продолжительности фотопериода на 1 ч стимулирует рост семян в высоту, однако у успевшей заложить верхушечные почки ели европейской интенсивность ростовых процессов была значительно ниже по сравнению с сосной обыкновенной.

Список литературы

1. Razzak M. D. Physiological changes in response to light intensity and R:FR ratio in Scots pine (*Pinus sylvestris*) // *Plant, cell & environment*. 2017. No. 40. P. 1–9.
2. Pallardy Stephen G. *Physiology of woody plants*. Academic Press, 2008. 469 p.
3. Ginkgo biloba retains functions of both type I and type II flowering plant phytochrome / S. Christensen [et al.] // *Plant and Cell Physiology*. 2002. No. 43. P. 768–777.
4. Sugiura D., Kojima M., Sakakibara H. Phytohormonal Regulation of Biomass Allocation and Morphological and Physiological Traits of Leaves in Response to Environmental Changes in *Polygonum cuspidatum* // *Front Plant Sci.*, 2016. No. 7. P. 1189.
5. Мешик О. П. Оценка гелиоэнергетических ресурсов климата Беларуси // *Вестн. Брест. гос. техн. ун-та Серия: Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология*. 2020. № 2. С. 93–99.
6. Разработка концепции и конструкторской документации системы досветки как технологической части проекта комплекса для экспериментальной площадки комплекса: отчет о НИР (заключ.) / Центр светодиод. и оптоэлектрон. технологий Нац. акад. наук Беларуси; рук. М. И. Баркун. Минск, 2021. 189 с.
7. 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. No. 34:3. P. 159–177.
8. Bantis F., Radoglou K. Morphology, development, and transplant potential of *Prunus avium* and *Cornus sanguinea* seedlings growing under different LED lights // *Turkish Journal of Biology*. 2017. No. 2 (41). P. 314–321.
9. Growth and Physiological Responses of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst) Supplemented with Monochromatic Red, Blue and Far-Red Light / F. OuYang [et al.] // *Forests*. 2021. No. 12 (164). URL: <https://www.mdpi.com/1999-4907/12/2/164> (date of access: 10.09.2022).
10. Influence of Light of Different Spectral Compositions on the Growth, Photosynthesis, and Expression of Light-Dependent Genes of Scots Pine Seedlings / P. Pashkovskiy [et al.] // *Cells*. 2021. No. 10 (12):3284. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8699472/> (date of access: 10.09.2022).
11. Cooke J. E. K., Eriksson M. E., Junttila O. The dynamic nature of bud dormancy in trees: environmental control and molecular mechanisms // *Plant Cell Environ.* 2012. No. 35. P. 1707–1728.
12. The joint influence of photoperiod and temperature during growth cessation and development of dormancy in white spruce (*Picea glauca*) / Jill A. Hamilton [et al.] // *Tree Physiology*. 2016. Vol. 36, issue 11. P. 1432–1448. DOI: 10.1093/treephys/tpw061.
13. Ekberg Inger, Gösta Eriksson. Photoperiodic Reactions in Conifer Species // *Holarctic Ecology*. 1979. Vol. 2, no. 4. P. 255–263. URL: <http://www.jstor.org/stable/3682420> (date of access: 07.03.2023).
14. Short-day photoperiods affect expression of genes related to dormancy and freezing tolerance in Norway spruce seedlings / E. Wallin [et al.] // *Annals of Forest Science*. 2017. Vol. 74, no. 59. DOI: 10.1007/s13595-017-0655-9.
15. Interactive Effects of Light Quality during Day Extension and Temperature on Bud Set, Bud Burst and PaFTL2, PaCOL1-2 and PaSOC1 Expression in Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) / C. Chiang [et al.] // *Forests*. 2021. Vol. 12, no. 3. P. 337.
16. Крамер П. Д., Козловский Т. Т. Физиология древесных растений. М.: Лесная пром-сть, 1983. 462 с.
17. Редько Г. И., Огиевский Д. В., Романов Е. М. Биозэкологические основы выращивания сеянцев сосны и ели в питомниках. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 62 с.

References

1. Razzak M. D. Physiological changes in response to light intensity and R:FR ratio in Scots pine (*Pinus sylvestris*). *Plant, cell & environment*, 2017, no. 40, pp. 1–9.
2. Pallardy Stephen G. *Physiology of woody plants*. Academic Press, 2008, pp. 469.
3. Christensen S., LaVerne E., Boyd G., Silverthorne J. Ginkgo biloba retains functions of both type I and type II flowering plant phytochrome. *Plant and Cell Physiology*, 2002, no. 43, pp. 768–777.
4. Sugiura D., Kojima M., Sakakibara H. Phytohormonal Regulation of Biomass Allocation and Morphological and Physiological Traits of Leaves in Response to Environmental Changes in *Polygonum cuspidatum*. *Front Plant Sci.*, 2016, no. 7, p.1189.

5. Meshik O. P. Evaluation of solar energy resources of the climate of Belarus. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Brest State Technical University], series: Water Construction, Thermal Power Engineering and Geoecology, 2020, no. 2, pp. 93–99 (In Russian).

6. *Razrabotka kontseptsii i konstruktorskoj dokumentatsii sistemy dosvetki kak tekhnologicheskoy chasti proyekta kompleksa dlya eksperimental'noy ploshchadki kompleksa: otchet o NIR (zaklyuchitel'nyy)*. [Development of the concept and design documentation of the lighting system as a technological part of the project of the complex for the experimental site of the complex: Research report (final)]. Minsk, 2021. 189 p. (In Russian).

7. 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, no. 34:3, pp. 159–177.

8. Bantis F., Radoglou K. Morphology, development, and transplant potential of *Prunus avium* and *Cornus sanguinea* seedlings growing under different LED lights. *Turkish Journal of Biology*, 2017, no. 2 (41), pp. 314–321.

9. OuYang F., Ou Y., Zhu T., Ma J., An S., Zhao J., Wang J., Kong L., Zhang H., Tigabu M. Growth and Physiological Responses of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst) Supplemented with Monochromatic Red, Blue and Far-Red Light. *Forests*, 2021, no. 12 (164). Available at: <https://www.mdpi.com/1999-4907/12/2/164> (accessed 10.09.2022).

10. Pashkovskiy P., Kreslavski V. D., Ivanov Y., Ivanova A., Kartashov A. Influence of Light of Different Spectral Compositions on the Growth, Photosynthesis, and Expression of Light-Dependent Genes of Scots Pine Seedlings. *Cells*, 2021, no. 10 (12):3284. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8699472/> (accessed 10.09.2022).

11. Cooke J. E. K., Eriksson M. E., Junttila O. The dynamic nature of bud dormancy in trees: environmental control and molecular mechanisms. *Plant Cell Environ*, 2012, no. 35, pp. 1707–1728.

12. Jill A. Hamilton, Walid El. Kayal, Ashley T. Hart, Daniel E. Runcie, Adriana Arango-Velez, Janice E. K. Cooke. The joint influence of photoperiod and temperature during growth cessation and development of dormancy in white spruce (*Picea glauca*). *Tree Physiology*, 2016, vol. 36, issue 11, pp. 1432–1448. DOI: 10.1093/treephys/tpw061.

13. Ekberg Inger, Gösta Eriksson. Photoperiodic Reactions in Conifer Species. *Holarctic Ecology*, 1979, vol. 2, no. 4, pp. 255–263. Available at: <http://www.jstor.org/stable/3682420> (accessed 07.03. 2023).

14. Wallin E., Gräns D., Jacobs D. F. Short-day photoperiods affect expression of genes related to dormancy and freezing tolerance in Norway spruce seedlings. *Annals of Forest Science*, 2017, vol. 74, no. 59. DOI: 10.1007/s13595-017-0655-9.

15. Chiang C., Aas O. T., Viejo M. Interactive Effects of Light Quality during Day Extension and Temperature on Bud Set, Bud Burst and PaFTL2, PaCOL1-2 and PaSOC1 Expression in Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Forests*, 2021, vol. 12, no. 3, p. 337.

16. Kramer P. D., Kozlovskiy T. T. *Fiziologiya drevesnykh rasteniy* [Physiology of woody plants]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1983. 462 p. (In Russian).

17. Red'ko G. I., Ogievskiy D. V., Romanov E. M. *Bioekologicheskiye osnovy vyrashchivaniya seyantsev sosny i yeli v pitomnikakh* [Bioecological bases of growing pine and spruce seedlings in nurseries]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1983. 62 p. (In Russian).

Информация об авторах

Носников Вадим Валерьевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры лесных культур и почвоведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: nosnikov@belstu.by

Босовец Мария Михайловна – инженер кафедры лесных культур и почвоведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: mariaice10062000@gmail.com

Селищева Оксана Александровна – кандидат сельскохозяйственных наук, старший преподаватель кафедры лесных культур и почвоведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: oksana_selishchava@mail.ru

Баркун Михаил Иосифович – ведущий инженер. Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий Национальной академии наук Беларуси (220090, г. Минск, Логойский тракт, 20, Республика Беларусь). E-mail: m_barkun@ledcenter.by

Information about the authors

Nosnikov Vadim Valer'evich – PhD (Agriculture), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Forest Plantations and Soil Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nosnikov@belstu.by

Bosovets Maria Mikhailovna – engineer, the Department of Forest Plantations and Soil Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mariaice10062000@gmail.com

Selishcheva Oksana Aleksandrovna – PhD (Agriculture), Senior Lecturer, the Department of Forest Plantations and Soil Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: oksana_selishchava@mail.ru

Barkun Mikhail Iosifovich – leading engineer. Center of LED and Optoelectronic Technologies of the National Academy of Sciences of Belarus (20, Logoisky Trakt, 220090, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: m_barkun@ledcenter.by

Поступила 15.03.2023