

УДК 577.344.2:53.047:57.043

ДВУХЧАСТОТНОЕ ИМПУЛЬСНОЕ ЛАЗЕРНОЕ ОБЛУЧЕНИЕ ДЛЯ СТИМУЛИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ХВОЙНЫХ ПОРОД ДЕРЕВЬЕВ

© 2024 г. А. В. Лобанов^{1, 2, 3*}, Л. М. Апашева¹, Л. А. Смурова¹,
Е. Н. Овчаренко¹, М. И. Будник¹, В. В. Савранский⁴

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова
Российской академии наук, Москва, Россия

²Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия

³Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва, Россия

⁴Федеральный исследовательский центр “Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук”, Москва, Россия

*E-mail: av.lobanov@mpgi.su

Поступила в редакцию 20.03.2023

После доработки 13.09.2023

Принята к публикации 20.09.2023

Показана возможность использования излучения двухчастотного импульсного лазера на парах меди с длинами волн 510.6 и 578.2 нм с экспозицией от 30 до 120 с для стимуляции развития хвойных пород деревьев (ель, сосна, лиственница) при однократном облучении семян. Эффект стимуляции проявляется на различных ранних этапах развития, таких как пробуждение семян в водной среде в первые часы эксперимента (по данным электронной абсорбционной спектроскопии), прорастание семян и рост сеянцев в стрессовых условиях культивирования. Обсуждаются возможные последствия светового воздействия на семена растений.

Ключевые слова: двухчастотное лазерное импульсное облучение, стимуляция роста, хвойные лесные культуры, электронная абсорбционная спектроскопия, метаболиты, антистрессовый эффект.

DOI: 10.31857/S0207401X24040095 EDN: VEKLMR

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время интенсивно исследуется возможность использования лазерного излучения для регулирования роста растений [1–3]. В основном объектами внимания являются агрокультуры (зерновые, бобовые, овощи и т.п.) [4–6]. Лесные культуры, особенно после катастрофических пожаров в последние годы, нуждаются в поиске наиболее эффективного стимулирования прорастания семян и роста сеянцев. Значительный интерес к хвойным лесным культурам связан также с возможностью использования их в качестве сырья для извлечения биологически активных веществ, таких, например, как дигидрокверцетин [7]. Изучение эффектов применения лазерной технологии может помочь лесовосстановлению.

Воспроизводство лесов требует длительного времени, поэтому применение различных методов, ведущих к ускорению выращивания древесных лесных культур, особенно актуально. Основными лесобразующими породами являются

хвойные деревья. Фазой жизненного цикла их семян является состояние длительного покоя. Ускоренное выведение семян из состояния покоя требует определенной предпосевной обработки.

Используются различные способы ускорения прорастания семян: прежде всего, это стратификация, применение ростостимулирующих препаратов, физические воздействия, в том числе применение различных источников оптического излучения [8, 9]. Наиболее распространено в агропромышленной практике для стимуляции роста сельскохозяйственных культур применение непрерывного излучения полупроводниковых лазеров и светодиодов в диапазоне длин волн 350–700 нм. Лазерное излучение повышает всхожесть семян, энергию прорастания, ускорение роста проростков и развитие их корневой системы. Можно подобрать излучение лазера с определенными оптимальными свойствами для его эффективного влияния на процессы, которые происходят в семенах. В работе [9] показано, что при

сравнении воздействия лазерного излучения различной мощности в непрерывном и импульсном режимах наиболее эффективным оказалось лазерное излучение импульсного режима в спектральном диапазоне с длинами волн 400–700 нм, мощностью 10^5 – 10^8 Вт в импульсе и частотой повторения 0.5–100 имп/с.

Цель данной работы — исследование возможности стимулирования роста хвойных пород деревьев, таких как ель, сосна и лиственница, с использованием метода двухчастотного лазерного импульсного облучения семян. Предложение использования двухчастотной лазерной импульсной обработки основывалось на предположении, что стимулирующие эффекты удастся получить при относительно коротком времени лазерного воздействия на семена, а наблюдать эффекты будет возможно уже на самых ранних стадиях развития хвойных растений. Для оценки эффекта воздействия лазерного излучения был применен метод электронной абсорбционной спектроскопии для фиксации метаболитов, выходящих в воду из семян в результате их прорастания, а также сравнивались в различных условиях процессы выведения семян из состояния покоя, их прорастания и первичного развития сеянцев.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В опыте использовали сухие семена ели обыкновенной *Picea abies*, сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* и лиственницы сибирской *Larix sibirica*, которые обрабатывали импульсным излучением лазера на парах меди. Излучение осуществлялось за счет одновременной генерации двух длин волн, соответствующих зеленому (510.6 нм) и желтому (578.2 нм) свету. Длительность импульса излучения — 15 нс, частота повторения импульсов — 10 кГц, суммарная энергия и мощность в импульсе — $3.0 \cdot 10^{-4}$ Дж и $2 \cdot 10^4$ Вт соответственно. Соотношение энергии и мощности между зеленой и желтыми линиями излучения составляло 3:1, плотность мощности — $2.0 \cdot 10^4$ Вт/см². Облучение семян проводили в течение 30, 60, 90 и 120 с при размещении их от источника излучения на расстоянии 15 см. В каждом варианте эксперимента использовали партию семян в количестве 30 шт.

Для тестирования эффекта последействия облучения семян лазером были выбраны следующие временные этапы: 1) первые часы эксперимента; 2) третьи–седьмые сутки; 3) пятнадцатые сутки;

4) двадцать четвертые сутки. Облученные и контрольные семена помещали в чашки Петри и добавляли определенный объем бидистиллированной воды. Электронные спектры поглощения метаболитов, вышедших в воду в процессе замачивания семян, записывали на спектрофотометре модели Specord S 300 UV-VIS производства компании Analytik Jena (Germany) в ультрафиолетовой области спектра 200–450 нм. Все измерения проводили при комнатной температуре в кварцевой кювете с длиной оптического пути 1 см. В кювету сравнения помещали бидистиллированную воду. Электронные спектры поглощения водных растворов в опыте и контроле записывали через определенные промежутки времени.

Другую часть обработанных лазером сухих семян раскладывали на увлажненные бумажные фильтры в чашки Петри и помещали в термостат при температуре +20 °С. Проросшие семена помещали в культуральные стеклянные сосуды с притертой крышкой на обедненный грунт — однократно увлажненный песок. Сосуды помещали в люминостат и выдерживали в условиях освещенности 130 люкс в режиме свет : темнота, соотношением 12:12 ч/сут. Стрессовые условия изоляции растений от окружающей среды позволяли не только выявлять эффект стимуляции, но и оценивать антистрессовое действие лазерного облучения в течение фиксированных промежутков времени.

Эксперимент повторяли шестикратно. Результаты независимых экспериментов, равно как и контрольных опытов, не различались более чем на 10%.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Одним из первых тестов, по которому можно судить об эффекте действия лазерного облучения на прорастание семян, является мониторинг выхода продуктов их жизнедеятельности в среду культивирования. Контрольными образцами в этом эксперименте служили семена, замоченные в воде без предварительного облучения.

Начальные стадии прорастания облученных и контрольных замоченных семян ели, сосны и лиственницы сопровождаются выходом в водную среду смеси метаболитов, имеющей характерный спектр поглощения в ультрафиолетовой области с четко выраженным максимумом поглощения

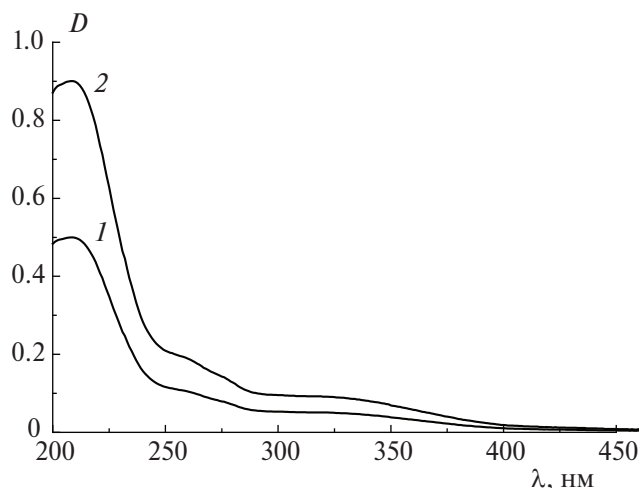


Рис. 1. Электронные спектры поглощения метаболитов, вышедших в водную среду при замачивании в течение 20 мин семян ели для контрольной группы (1) и для опытной группы с облучением в течение 90 с (2).

на длине волны $\lambda = 210$ нм и полосами меньшей интенсивности в интервале длин волн $\lambda = 250$ –400 нм. Вид спектра не изменялся по ходу процесса замачивания, что может свидетельствовать о том, что определенный состав продуктов, выходящих в водную среду замоченных семян, остается постоянным в течение длительного времени. Другие возможные метаболиты не имеют заметного поглощения в ультрафиолетовой области на начальных стадиях прорастания или выходящие в водную среду продукты ограничиваются только этим составом, который остается постоянным в течение процесса наблюдения.

Выход метаболитов, регистрируемый по электронным спектрам поглощения (рис. 1), наблюдался практически сразу после замачивания, когда морфологические изменения еще не проявляются. Можно предполагать, что вещества, выделяющиеся в водную среду, представляют собой продукты катаболизма, такие как аминокислоты, витамины, кофакторы и другие соединения, содержащие ароматические и гетероциклические фрагменты.

Измеряемая величина оптической плотности (D) в максимуме поглощения при 210 нм в контроле и опытах может рассматриваться как показатель интенсивности жизнедеятельности семян в водной среде на самых ранних стадиях прорастания. На рис. 2 представлены кинетические кривые выхода метаболитов во времени (D – t , мин) при замачивании семян ели для контрольных

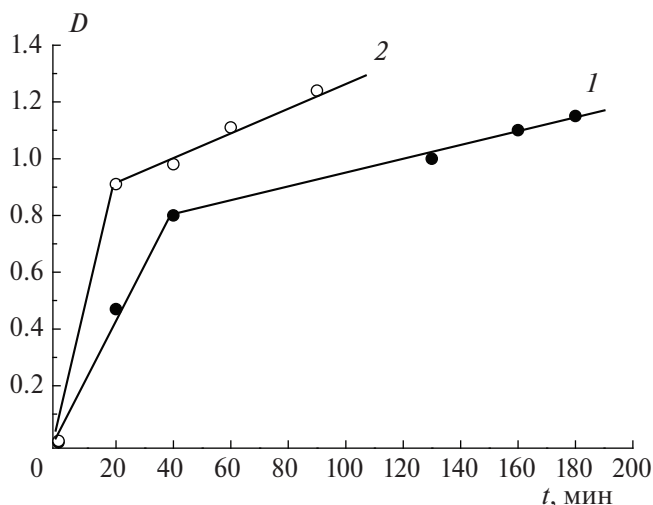


Рис. 2. Кинетические кривые выхода метаболитов при замачивании семян ели для контрольной группы (1) и для опытной группы с облучением в течение 90 с (2).

(кривая 1) и опытных групп, где использовали облучение лазером в течение 90 с (кривая 2).

Из кривых на рис. 2 видно, что процесс метаболизма в первые минуты контакта семян с водой происходит достаточно быстро с начальной скоростью $W_k = 4 \cdot 10^{-2}$ отн. ед./мин для контроля и $W_o = 8 \cdot 10^{-2}$ отн. ед./мин для опыта. Далее скорость выхода метаболитов уменьшается до значений $W_k = 1 \cdot 10^{-2}$ отн. ед./мин и $W_o = 3 \cdot 10^{-2}$ отн. ед./мин для контроля и опыта соответственно. Таким образом, процесс метаболизма облученных лазером в течение 90 с семян ели происходит приблизительно в 2 раза быстрее в начальный период и в 3 раза с течением времени по сравнению с контролем. Выход метаболитов в опытах с меньшим временем облучения семян (30 и 60 с соответственно) практически не отличался от выхода в контрольном опыте, а увеличение времени облучения до 120 с не приводило к увеличению стимулирующего эффекта. Таким образом, для семян ели эффект наблюдается только при оптимальном времени облучения 90 с.

Аналогичные эксперименты были проведены и для семян сосны и лиственницы. Эффект наибольшего выхода метаболитов для семян этих хвойных растений по сравнению с контролем наблюдали (превышение в 2.5–2.8 раза) при времени облучения семян 60 с. Дальнейшее увеличение времени облучения до 90 и 120 с практически не способствовало росту эффекта.

Таблица 1. Данные по учету относительного количества проросших семян (на 3–7-е сут), растений с раскрытыми семядолями (на 15-е сут) и со свободной зеленой хвоей (на 24-е сут)

Продолжительность выращивания	Длительность облучения лазером, с				
	0	30	60	90	120
Ель					
7 сут	20±2%	21±2%	24±2%	70±4%	67±4%
15 сут	20±%	23±%	24±2%	70±4%	70±4%
24 сут	20±%	24±%	24±2%	75±4%	73±4%
Сосна					
3 сут	5±1%	8±1%	60±4%	58±4%	59±4%
15 сут	12±1%	12±1%	55±3%	53±3%	52±3%
24 сут	18±2%	20±2%	52±3%	52±3%	50±3%
Лиственница					
5 сут	7±1%	12±1%	62±4%	59±4%	60±4%
15 сут	17±2%	14±1%	52±3%	50±3%	54±3%
24 сут	20±2%	20±2%	51±3%	50±3%	51±3%

В целом можно сделать вывод, что спектрофотометрическая методика позволяет контролировать процесс накопления метаболитов на начальных стадиях прорастания семян и может служить экспресс-методом определения эффективности воздействия при использовании различных методов стимулирования.

Подтверждением эффекта стимулирующего действия лазерного облучения, приведенного ранее, являются полученные данные по учету количества проросших семян хвойных деревьев после 3–7 сут эксперимента (табл. 1). Проросшими считали семена с длиной корня 0.1–0.5 см. Для ели в контроле определено лишь 20% проросших семян на 7-е сут эксперимента. Наиболее выраженный эффект стимуляции отмечен при облучении семян ели в течение 90 с – 70% проросших семян. Дальнейший учет эффекта последствие лазера показал, что на 15-е сут выращивания сеянцев из проросших семян ели на песке получено, что доля растений с раскрытыми семядолями в контроле составляет 20%, в опыте этот показатель соответствует 70%. Далее на 24-е сут опыта определено количество сеянцев со свободной зеленой хвоей. В опыте со временем облучения в течение 90 с наиболее развитых сеянцев было более 75%, в контроле эта величина не превысила 20%.

Близкие результаты получены в экспериментах с облучением семян сосны и лиственницы (табл. 1). Наибольший эффект стимуляции определен при времени облучения семян в течение 60 с. Начало прорастания семян сосны фиксиро-

вали на 3-е сутки культивирования на фильтрах, семян лиственницы – на 5-е сутки. В контроле определено 5% и 7% проросших семян сосны и лиственницы, соответственно, в опыте – около 60% для обоих типов растений. При культивировании в стрессовых условиях изоляции от среды наиболее развитых сеянцев сосны и лиственницы с высотой ≥4 см в контроле было не более 18–20%, тогда как в опытах отмечено не менее 50% жизнеспособных развитых сеянцев.

Нами выбран импульсный лазер с частотой повторения 10 кГц и длинами волн 510.6 и 578.2 нм (зеленая и желтая линии спектра соответственно), работающих одновременно. Выбор импульсного лазера с двухчастотным излучением обусловлен следующими причинами.

В монографии Г.Я. Фрайкина [10] показано, что некоторые белки, находящиеся в растительном семени, являются оптическими сенсорами спектра излучения солнца в области от УФ- до ближнего ИК-диапазона. В фоторегуляции биохимических процессов участвуют пять основных белков-сенсоров. Причем каждый из этих белков-фитохромов чувствителен к определенной части спектра в диапазоне $\lambda = 290–750$ нм. Фоторецепторные белки запускают определенные каналы биохимических реакций растений, активность развития которых зависит от различных параметров излучения, а именно от его интенсивности, длительности, поляризации, когерентности и длины волны, активирующей соответствующий белок-сенсор.

Большая часть белков, аминокислот и хромофоров в семенах высших растений имеют структуру молекулярных кристаллов, которые обладают высоким значением оптической нелинейной восприимчивости (гиперполяризуемостью) [11–13], и в результате взаимодействия с высокоинтенсивным оптическим двухчастотным излучением дают дополнительно суммарную и разностную частоты. В данных экспериментах мощность излучения в импульсе составляла 20 кВт, что достаточно для реализации параметрического процесса в растительном семени. При использовании зеленой и желтой линий лазера появляются новые длины волн излучения: 271 (УФ-свет) и 4367 нм (ИК-свет). В итоге реализуется четырехчастотное воздействие, значительно отличающееся от одночастотного. Вследствие этого становится возможным протекание биохимических реакций по четырем каналам, что, несомненно, сказывается на процессах жизнедеятельности и проявляется в ускорении развития семян. Возможно, что образование в результате облучения активных радикальных частиц, обусловленное присутствием в эндосперме фотоактивных металлокомплексов и пигментов, также стимулирует развитие семян [14–16]. Ранее в работе [17] было зарегистрировано появление реакционноспособных активных форм кислорода, продуцируемых фотолизом комплексов нуклеиновых кислот в водной среде при воздействии мощного лазерного излучения.

Нельзя исключать проявления необычных свойств эндогенных веществ семени при облучении. В работе [18] показано, что обычно нечувствительные к видимому свету аминокислоты в случае взаимодействия с высокоинтенсивным светом меняют свои свойства и становятся фоточувствительными. Экспериментально зарегистрировано изменение структуры аминокислоты глицина и, как следствие, изменение его спектра излучения в диапазоне $2500\text{--}500\text{ см}^{-1}$. Кроме того, обнаружено появление спектров поглощения и излучения глицина в водном растворе в ближней УФ- и видимой областях (240–600 нм). Перечисленные обстоятельства дают возможность предположить появление дополнительных каналов биохимических реакций в облученных семенах и в результате ускорить развитие растений.

В заключение можно отметить, что физическое воздействие может позволить достичь значимых эффектов влияния на биологические объекты

[19–22]. При сравнении двухчастотной лазерной импульсной обработки семян с другими методами воздействия необходимо отметить преимущества этого метода по нескольким показателям: а) эффект действия лазера возможно получить при однократном и кратковременном (секунды) воздействии; б) исключается внесение в окружающую среду загрязняющих веществ; в) значительно сокращается интервал времени между воздействием, эффектом действия и тестированием получаемого результата; г) одновременно с эффектом стимулирующего действия лазера на рост растений проявляется и антистрессовый эффект действия лазера; д) применение метода электронной абсорбционной спектроскопии дает возможность фиксировать получаемый эффект пробуждения семян уже через 1–2 ч после воздействия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, однократная кратковременная обработка сухих семян хвойных пород деревьев двухчастотным импульсным лазерным облучением является эффективным способом стимуляции развития хвойных пород деревьев на ранних этапах роста. Взаимодействие в среде зеленого и желтого излучения приводит к образованию дополнительных длин волн: суммарной длины волны – 271 нм и разностной – 4.37 мкм. Воздействие четырех частот в разном спектральном диапазоне (УФ-, видимом и ИК-диапазоне) четырех длин волн приводит к инициации по меньшей мере четырех вызванных излучением биохимических реакций в семени. На примере семян и сеянцев ели, сосны и лиственницы показано, что соответствующая предпосевная обработка приводит к интенсификации прорастания семян и ранних стадий развития растений. В целом результаты работы позволяют считать, что стимулирующие методы воздействия на рост хвойных культур помогут решению вопросов лесовосстановления и расширения природной сырьевой базы.

Работа выполнена в рамках проекта “Исследование проблем утилизации отходов природного происхождения в целях практического использования полученных продуктов” (122122600056-9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Букатый В.И., Карманчиков В.П. Лазер и урожай. Барнаул: Изд-во АГУ, 1999.

2. Журба П.С., Журба Е.П. // Фотоника. 2010. № 3. С. 34.
3. Будаговский А.В., Ковш И.Б. Лазерные технологии в сельском хозяйстве. М.: Техносфера, 2008.
4. Шульгина О.А., Колесников Г.И., Заостровных В.И., Зайцев Г.И. // Вестн. КемГУ. Сер.: Биологические, технические науки и науки о Земле. 2017. № 1. С. 23.
5. Гаджимусиева Н.Т., Асварова Т.А., Абдулаева А.С. // Фундамент. исследов. 2014. № 11. С. 1939.
6. Буклагин Д.С., Голубев И.Г., Мишуров Н.П. Применение лазерных технологий в сельском хозяйстве и перерабатывающей промышленности: аналитический обзор. М.: ФГБНУ “Росинформагротех”, 2020.
7. Loers G., Yashunsky D.V., Nifantiev N.E., Schachner M. // Journal of Natural Products. 2014. V. 77. № 7. P. 1554. <https://doi.org/10.1021/nr4009738>
8. Юран С.И., Заринов М.Р., Вершинин М.Н. // Вестн. НГИЭИ. 2021. № 7 (122). С. 16. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2021-7-16-25>
9. Grishkanich A., Zhevlakov A., Polyakov V. et al. // Proc. of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2016. V. 9887. № 98873J. <https://doi.org/10.1117/12.2228959>
10. Фрайкин Г.Я. Белковые сенсоры света: фотовозбужденные состояния, сигнальные свойства и применение в оптогенетике. М.: АР-Консалт, 2018.
11. Коренева Л.Г., Золин В.Ф., Давыдов Б.Л. Нелинейная оптика молекулярных кристаллов. М.: Наука, 1985.
12. Полковников Б.Ф. // Квантовая электрон. 1979. Т. 6. № 6. С. 1353. <https://doi.org/10.1070/QE1979v009n06ABEN009177>
13. Градова М.А., Жданова К.А., Брагина Н.А., Лобанов А.В., Мельников М.Я. // Изв. АН. Сер. хим. 2015. № 4. С. 806.
14. Комиссаров Г.Г. // Хим. физика. 2003. Т. 22. № 1. С. 24.
15. Лобанов А.В., Голубева Е.Н., Зубанова Е. М., Мельников М.Я. // Химия высоких энергий. 2009. Т. 43. № 5. С. 438.
16. Карпова С.Г., Ольхов А.А., Кривандин А.В., Шаталова О.В., Лобанов А.В., и др. // Высокомолекуляр. соединения. А. 2019. Т. 61. № 1. С. 67.
17. Никогосян Д.Н., Ораевский А.А., Рупасов В.И. // Хим. физика. 1983. Т. 2. № 3. С. 394.
18. Терпугов Е.Л., Удальцов С.Н., Дегтярева О.В. // Биофизика. 2021. Т. 66. № 5. С. 856.
19. Островский М.А., Надточенко В.А. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 4. С. 76.
20. Пелевина И.И., Аклеев А.В., Когарко И.Н., и др. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 12. С. 48.
21. Сергейчев К.Ф., Лукина Н.А., Апашева Л.М., Овчаренко Е.Н., Лобанов А.В. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 1. С. 60.
22. Савинцева Л.А., Авдошин А.А., Игнатов С.К. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 6. С. 55.

TWO-FREQUENCY PULSED LASER IRRADIATION TO STIMULATE THE DEVELOPMENT OF CONIFEROUS TREES

A. V. Lobanov^{a, b, c*}, L. M. Apasheva^a, L. A. Smurova^a, E. N. Ovcharenko^a,
M. I. Budnik^a, V. V. Savransky^d

^a*Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Moscow Pedagogical State University, Moscow, Russia*

^c*Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia*

^d*Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*E-mail: av.lobanov@mpgu.su

The possibility of using radiation from a two-frequency pulsed copper vapor laser with wavelengths of 510.6 nm and 578.2 nm with an exposure of 30 to 120 s to stimulate the development of coniferous trees (spruce, pine, larch) with a single seed irradiation is shown. The stimulation effect manifests itself at various early stages of development, such as the awakening of seeds in the aquatic environment in the first hours of the experiment (according to electron absorption spectroscopy data), seed germination, and seedling growth under stressful cultivation conditions. Possible causes of light exposure to plant seeds are discussed.

Keywords: two-frequency pulsed laser irradiation, growth stimulation, conifers, electron absorption spectroscopy, metabolites, anti-stress effect.

REFERENCES

1. V. I. Bukaty, V. P. Karmanchikov. Laser and harvest. Barnaul: ASU Publishing House (1999).
2. P. S. Djurba and E. P. Djurba, Photonics Rus. **3**, 34 (2010).
3. A. V. Budagovsky, I. B. Kovsh. Laser technologies in agriculture. M.: Technosfera (2008).
4. O. A. Shulgina, G. I. Kolesnikov, V. I. Zaostrovnykh, and G. I. Zaitsev, Vestnik KemGU. Series: Biol., Techn. Earth Sci. **1**, 23 (2017).
5. N. T. Gadzhimusieva, T. A. Asvarova, and A. S. Abdulaeva, Fundam. Res. **11**, 1939 (2014).
6. D. S. Buklagin, I. G. Golubev, N. P. Mishurov. Application of laser technologies in agriculture and processing industry: an analytical review. M.: FGBNU "Rosinformagrotech" (2020).
7. G. Loers, D. V. Yashunsky, N. E. Nifantiev, and M. Schachner, J. Nat. Prod. **77**, 1554 (2014).
<https://doi.org/10.1021/np4009738>
8. S. I. Yuran, M. R. Zaripov, V. N. Vershinin, Bulletin NGIEI. 2021. № 7 (122), 16. (2021).
<https://doi.org/10.24412/2227-9407-2021-7-16-25>
9. A. Grishkanich, A. Zhevlakov, V. Polyakov V., et al., Proc. SPIE – Int. Soc. Opt. Eng. 2016. V. **9887**. 98873J. (2016).
<https://doi.org/10.1117/12.2228959>
10. G. Ya. Fraykin. Protein light sensors: photoexcited states, signaling properties and applications in optogenetics. M.: AR-Consult (2018).
11. L. G. Koreneva, V. F. Zolin, B. L. Davydov. Nonlinear optics of molecular crystals. M.: Science (1985).
12. B. F. Polkovnikov, J. Quantum Electron. **9**, 796 (1979).
<https://doi.org/10.1070/QE1979v009n06ABEH009177>
13. M. A. Gradova, K. A. Zhdanova, N. A. Bragina, A. V. Lobanov, M. Ya. Mel'nikov, Russ. Chem. Bull. **64**, 806 (2015).
<https://doi.org/10.1007/s11172-015-0937-z>
14. G. G. Komissarov, Khimicheskaya fizika **22**, 24 (2003).
15. A. V. Lobanov, E. N. Golubeva, E. M. Zubanova, M. Ya. Mel'nikov, High Energ. Chem. **43**, 384 (2009).
<https://doi.org/10.1134/s0018143909050099>
16. S. G. Karpova, A. A. Ol'khov, A. V. Krivandin, et al., Polym. Sci. – Ser. A **61**, 70 (2019).
<https://doi.org/10.1134/S0965545X19010140>
17. D. N. Nikogosyan, A. A. Oraevsky, V. I. Rupasov, Soviet J. Chem. Phys., **2** (3) 659 (1985).
18. E. L. Terpugov, S. N. Udaltsov, and O. V. Degtyareva, Biophys. **66**, 856 (2021).
19. M. A. Ostrovsky and V. A. Nadtochenko, Russ. J. Phys. Chem. B **15**, 344 (2021).
<https://doi.org/10.1134/S1990793121020226>
20. I. I. Pelevina, A. V. Akleev, I. N. Kogarko, et al., Russ. J. Phys. Chem. B **15**, 1046 (2021).
<https://doi.org/10.1134/S1990793121060233>
21. K. F. Sergeichev, N. A. Lukina, L. M. Apasheva, E. N. Ovcharenko, A. V. Lobanov, Russ. J. Phys. Chem. B **16**, 84 (2022).
<https://doi.org/10.1134/S1990793122010134>
22. L. A. Savintseva, A. A. Avdoshin, S. K. Ignatov, Russ. J. Phys. Chem. B **16**, 445 (2022).
<https://doi.org/10.1134/s1990793122030216>