

Научная статья

УДК 630*23

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-5-204-211

Применение обработанной плазмой воды для подготовки семян хвойных пород к посеву

О.И. Гаврилова[✉], *д-р с.-х. наук, доц.*; *ResearcherID: AAF-6295-2019*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5618-8239>

К.В. Гостев, *канд. техн. наук*; *ResearcherID: HLW-5102-2023*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2286-059X>

Петрозаводский государственный университет, просп. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Россия, 185910; ogavril@mail.ru[✉], kgostev@petsu.ru

Поступила в редакцию 15.04.22 / Одобрена после рецензирования 26.07.22 / Принята к печати 04.08.22

Аннотация. Рассмотрены вопросы ускоренного выращивания качественного посадочного материала с применением способа подготовки семян намачиванием в обработанной разрядом низкотемпературной плазмы воде. Наиболее перспективным посадочным материалом являются сеянцы с закрытой корневой системой. Они выращиваются из сортового и улучшенного посевного материала в оптимальных условиях теплиц. При разных способах стимулирования прорастания зародыша семени представляет интерес воздействие на него «холодной» плазмой. С помощью специально разработанного прибора, позволяющего обрабатывать воду разрядом низкотемпературной плазмы, была получена обработанная плазмой вода для намачивания семян. Время обработки воды варьировало от 1 до 4 мин. После обработки плазмой вода имела отличные от обычной воды показатели кислотности (активация воды). Восстановление уровня кислотности обработанной плазмой воды заняло от 2 до 4 сут. Получены показатели всхожести и энергии прорастания для семян *Pinus sylvestris* и *Picea abies*, намачиваемых в воде с разной длительностью обработки плазмой. При намачивании семян в воде, обработанной плазмой в течение 1, 2 и 4 мин, энергия прорастания увеличилась для сосны на 20–31 %, для ели – на 6–18 % по сравнению с контролем (намачивание в дистиллированной воде). Техническая всхожесть семян сосны выросла на 11–21 %, ели – на 3–16 %. Результаты исследований демонстрируют изменение в структуре и составе питательного вещества семени, в строении зародыша и степени его развития. Анализ химического состава эндосперма семян через сутки после намачивания относительно сухих семян показал увеличение в нем содержания углерода на 2–3 % и уменьшение содержания кислорода на 1 %, калия – на 0,5 %. При намачивании семян в дистиллированной воде содержание в эндосперме фосфора падает на 0,15 %, а содержание натрия – на 0,2 %. Для семян, намоченных в обработанной плазмой воде, содержание фосфора снизилось на 0,21–0,22 %, а содержание натрия не отмечено. Намачивание семян в обработанной плазмой воде стимулирует процессы их подготовки к прорастанию и дифференциацию тканей зародыша (формирование семядолей) по сравнению с семенами, намачиваемыми в дистиллированной воде.

Ключевые слова: лесной питомник, теплица, семена, сосна обыкновенная, ель европейская, эндосперм, зародыш, всхожесть, холодный плазменный спрей

Для цитирования: Гаврилова О.И., Гостев К.В. Применение обработанной плазмой воды для подготовки семян хвойных пород к посеву // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 5. С. 204–211. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-204-211>

Original article

Use of Plasma-treated Water to Prepare Seeds of Coniferous Species for Sowing

Olga I. Gavrilova[✉], Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAF-6295-2019](https://orcid.org/0000-0002-5618-8239),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5618-8239>

Kirill V. Gostev, Candidate of Engineering; ResearcherID: [HLW-5102-2023](https://orcid.org/0000-0003-2286-059X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2286-059X>

Petrozavodsk State University, Lenina prosp., 33, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation; ogavril@mail.ru[✉], kgostev@petrsu.ru

Received on April 15, 2022 / Approved after reviewing on July 26, 2022 / Accepted on August 4, 2022

Abstract. The article discusses the accelerated cultivation of quality planting material using the method of seed preparation by soaking in water treated in low-temperature plasma discharge. The most promising planting material are seedlings with closed root system. They are grown from improved seed grain in optimal conditions of greenhouses. Among various methods of stimulating germination of the seed germ, it is of interest to influence it with “cold” plasma. With the help of a specially designed device, which allows to treat water with low-temperature plasma discharge, plasma-treated water for soaking seeds was obtained. The time of water treatment varied from 1 to 4 min. Water activated by plasma had acidity indicators other than those of ordinary water. The time of acidity level restoration was from 2 to 4 days. Germination rates and germination energy were obtained for seeds of *Pinus silvestris* and *Picea abies* soaked in water with different duration of plasma treatment. When seeds were soaked in water treated with plasma for 1, 2 and 4 min, germination energy increased by 20–31 % for pine and by 6–18 % for spruce compared to the control (soaking in distilled water). Technical germination of pine seeds increased by 11–21 %, for spruce by 3–16 %. The results of research show changes in the structure and composition of the nutrient substance of the seed, in the structure of the germ and the degree of its development. Analysis of the chemical composition of seed endosperm a day after soaking relative to dry seeds showed an increase in its carbon content by 2–3 % and a decrease in oxygen by 1 %; potassium – by 0.5 %. When seeds were soaked in distilled water, the content of phosphorus in the endosperm decreased by 0.15 %, and the content of sodium – by 0.2 %. For seeds soaked in plasma treated water, phosphorus content decreased by 0.21–0.22 % and sodium content was not observed. Soaking seeds in plasma-treated water stimulates the processes of their preparation for germination and differentiation of germ tissues (formation of seed pods), compared to seeds soaked in water.

Keywords: forest nursery, greenhouse, seeds, common pine, common spruce, endosperm, germ, germination, cold plasma spray

For citation: Gavrilova O.I., Gostev K.V. Use of Plasma-treated Water to Prepare Seeds of Coniferous Species for Sowing. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 5, pp. 204–211. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-204-211>

Введение

Интенсификация лесовосстановления, которая является приоритетным направлением лесного хозяйства, в первую очередь требует качественного посадочного материала. Наиболее перспективным считается посадочный материал с закрытыми корнями [1, 4, 5]. Такие сеянцы чаще выращивают в контролируемых условиях [3, 9]. Ускорение прорастания семян особенно актуально в условиях тепличного хозяйства, когда каждый день важен для формирования всходов [5, 6, 16]. Кроме того, при использовании улучшенных семян с лесосеменных плантаций следует экономить качественное семенное сырье [11]. Для подготовки семян к посеву используется множество способов, одни из которых имитируют природные условия на этапе прорастания [5, 10, 15, 18], другие воздействуют на зародыш семени химически [7, 16, 17].

В настоящее время разработаны способы выведения семян из вынужденного покоя физическими методами. Одним из таких методов является намачивание семян в воде, обработанной плазмой [2, 8, 12–14]. Способ, предложенный в [1], с применением аэрозольных систем с диспергированием потока холодной плазмы, разработанных научно-образовательным центром «Плазма» Петрозаводского государственного университета, имел малую производительность, не позволяющую обрабатывать значимые объемы семян. С целью увеличения производительности был разработан импульсный генератор переохлажденной плазмы [8], используемый для получения обработанной плазмой воды (ОПВ).

Цель работы – исследование влияния обработанной в разряде холодной плазмы воды на всхожесть семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и ели европейской (*Picea abies* L.) и динамику развития зародыша и эндосперма спустя сутки после намачивания.

Объекты и методы исследования

Для подготовки семян основных лесобразующих пород – сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и ели европейской (*Picea abies* L.) – использовали устройство для обработки воды в разряде низкотемпературной плазмы. Объем обрабатываемой воды – 0,75 л, температура обработки – 40–50 °С, напряжение горения разряда – 5 кВ, импульсный ток – ~40 А, энергия одного импульса – ~1 Дж, скважность – 0,1–0,01, частота импульсов – 1–10 Гц, потребляемая мощность – 50 Вт. При работе импульсного генератора образуется область плазмы, на границе которой происходит воздействие плазмы на воду. Спектр излучения разряда плазмы показывает наличие линий ОН, Н, О, О₂, О₃, Н₂, что говорит о высокой степени разложения воды. Большое количество заряженных частиц приводит к переходу воды в метастабильное энергетическое состояние (активация воды).

Измерение уровня кислотности воды рН-метром показало, что обработка воды плазмой в течение 2 мин привела к изменению кислотности с 6,5 до 8 ед. В течение 24 ч происходило постепенное выравнивание уровня рН до начального, однако при обработке воды плазмой в течение 4 мин наблюдали колебания рН и постепенное восстановление в течение 4 сут. [1].

Для исследования взяты семена сосны обыкновенной 1-го класса качества, с технической всхожестью по сертификату 87 %, и семена ели европейской 2-го класса качества, их техническая всхожесть по сертификату – 76 %. Семена имели местное происхождение и были заготовлены на территории При-

онежского центрального лесничества Республики Карелии. Семена брали в 4 повторностях по 100 семян в каждой.

Семена после намачивания в течение 24 ч в дистиллированной воде, а также в ОПВ (время обработки плазмой – 1, 2 и 4 мин) проращивали по стандартной методике в лабораторных условиях и отмечали появление проростков на 3, 5, 7, 10 и 15 сут. Температура воздуха – 20–22 °С, температура на ложе – 22–24 °С (ГОСТ 13056.6–97 «Семена деревьев и кустарников. Метод определения всхожести»).

Для анализа процессов, происходящих в семени, и степени воздействия на семя ОПВ определяли содержание элементов минерального питания в эндосперме семян. Анализ состава основных химических элементов эндосперма, степени развития зародыша и структуры эндосперма проводили с помощью электронного микроскопа фирмы Hitachi SU1510. Исследовали семена ели европейской, намоченные в течение 24 ч в дистиллированной воде, в ОПВ в течение 2 мин, а также сухие. После химического анализа сделаны срезы и получены фотографии.

Результаты исследования и их обсуждение

Всхожесть семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и ели европейской (*Picea abies* L.) определяли неоднократно в течение 2018–2019 гг. Она была существенно выше относительно всхожести семян в контроле. Наиболее существенные результаты получены при исследовании скорости прорастания намоченных в ОПВ семян. Они в условиях лаборатории проросли на 3–4 дня раньше семян, намоченных в дистиллированной воде (табл. 1). Процент проросших семян, определяемый на 15-й день проращивания как для сосны, так и для ели был максимальным при времени воздействия на воду 2 мин. При этом отмечено, что энергия прорастания, фиксируемая на 7-й и 10-й дни учета соответственно, превышала показатели контрольного варианта. Таким образом, обработка семян ОПВ привела к увеличению не только энергии прорастания, но и общей всхожести.

Таблица 1

Всхожесть семян хвойных пород при 24-часовом намачивании в ОПВ, %
Germination of coniferous seeds at 24-hour soaking in water treated with plasma, %

Продолжительность обработки воды плазмой, мин	День учета				
	3	5	7	10	15
<i>Сосна обыкновенная</i>					
1	12,5	60,5	79	81	81
2	10	64	80	81	82
4	7	53	68	71	72
Контроль (дистиллированная вода)	8	34	48	58	61
<i>Ель европейская</i>					
1	0	2	38	42	46
2	0	4	50	56	59
4	0	4	48	52	55
Контроль (дистиллированная вода)	0	0	25	38	42,5

Анализ состава элементов минерального питания в семени ели европейской показал значительные изменения в процентном соотношении химических элементов (табл. 2).

Таблица 2

**Содержание основных питательных веществ
в эндосперме семян ели европейской, %**
Content of main nutrients in the endosperm of seeds of common spruce, %

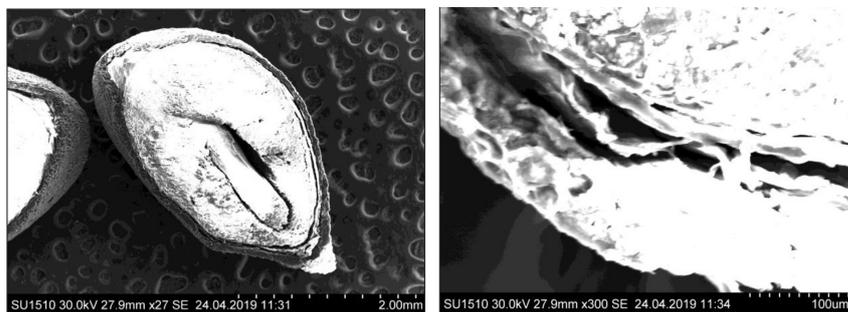
Элемент	Семена, намоченные в течение 24 ч		Сухие семена без обработки (заготовка 2013 г.)
	в дистиллированной воде	в ОПВ*	
C	67,74±0,39	67,80±0,37	65,63±0,40
O	30,12±0,42	30,33±0,41	31,26±0,44
Na	0,17±0,03	0	0,37±0,03
Mg	0,39±0,03	0,44±0,02	0,48±0,02
P	0,77±0,02	0,71±0,02	0,92±0,02
Cl	0,14±0,01	0,07±0,01	0,26±0,02
S	0	0,19±0,01	0,28±0,01
K	0,47±0,02	0,35±0,01	0,81±0,01
Mo	0,20±0,01	0,20±0,01	0
Zn	0	0,11±0,02	0
<i>Всего</i>	100	100	100

* Время обработки воды – 2 мин.

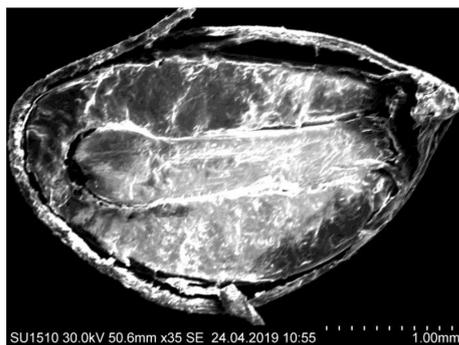
Семена ели европейской, которые хранились в стеклянных бутылках в специализированном семяхранилище при температуре -6°C в течение 5 лет, содержали в эндосперме 65,62 % углерода (табл. 2). При намачивании в воде его содержание увеличилось в процессе поглощения воды семенем за 1-е сутки примерно на 2–3 %. Различия в содержании углерода в эндосперме для всех вариантов намоченных водой семян и сухих семян достоверны на 5%-м уровне значимости ($t_{st} = 3,77; 3,98$ и $4,31 > 3$). При этом не отмечено различий между семенами, намоченными в ОПВ и в дистиллированной воде. Обнаружено уменьшение содержания кислорода в эндосперме семян, намоченных в воде разных вариантов (ОПВ и дистиллят), примерно на 1 %, с 31 до 30 % общего веса данного элемента. Это свидетельствует о начале окислительных процессов в эндосперме независимо от варианта применяемой для обработки семян воды. В процессе набухания активно расходуется фосфор, его содержание в сухом семени уменьшается с 0,92 до 0,77–0,70 % ($t_{st} = 7,85; 7,5; 5,35 > 3$). Таким же образом расходуется в эндосперме семян калий – происходит снижение содержания этого элемента с 0,81 до 0,35 % для семян, намоченных в ОПВ, и до 0,47 % для семян, намоченных в дистиллированной воде. Различия с сухими семенами существенны: $t_{st} > 3$. Изменение в натриево-калиевом балансе, связанном с обеспечением клеток водой, проявляется также в уменьшении содержания натрия в эндосперме семян. Его содержание меняется от 0,37 % для сухих семян до 0,17 % для намоченных дистиллированной водой; натрий не обнаружен в эндосперме семян, намоченных ОПВ. Таким образом, выявлено существенное различие в химическом составе эндосперма сухих семян, семян, намоченных в дистиллированной воде, и семян, намоченных в ОПВ.

Отмечено изменение структуры эндосперма и качественного состояния зародыша. На продольном разрезе семени (см. рисунок, а) видно, что эндосперм сухих семян имеет плотную структуру, не насыщен водой. Зародыш занимает не

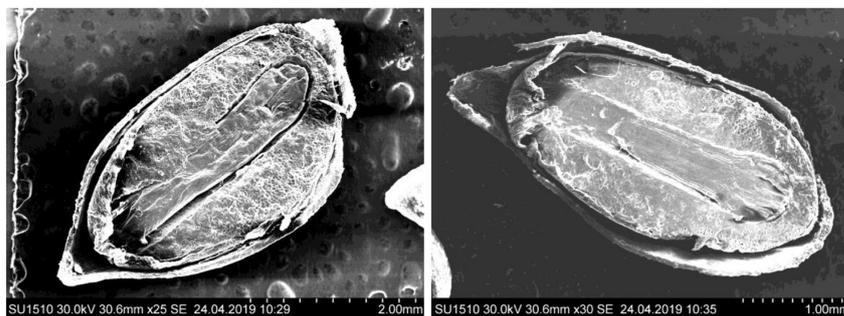
более половины зародышевого канала и не дифференцирован на корешок, гипокотиль и семядоли. Семенная кожура чешуйчатая, наблюдается ее отслоение от эндосперма. Семена ели, которые прошли намачивание дистиллированной водой, имели рыхлую структуру эндосперма, отмечены отслоение семенной кожуры, существенное увеличение зародыша и первичная дифференциация его на органы (см. рисунок, б). На фотографии с электронного микроскопа хорошо заметны изменения, произошедшие в семенах, намоченных в ОПВ (см. рисунок, в). Здесь структура тканей эндосперма также рыхлая, однако для всех исследуемых семян отмечался рост зародыша в длину (он занимал практически весь зародышевый канал) и формирование семядолей. В семени справа отчетливо видно появление семядолей, слева – заполнение зародышевого канала.



a



б



в

Семена ели европейской в разрезе: *a* – сухое, справа – семенная кожура с эндоспермом; *б* – намоченное в течение 24 ч в дистиллированной воде; *в* – намоченное в течение 24 ч в ОПВ (время обработки воды – 2 мин)

Common spruce seeds cutaway: *a* – on the seed skin with endosperm (right) for dry seed; *б* – soaked for 24 hours in distilled water; *в* – soaked for 24 hours in water, treated with plasma for 2 minutes

Итак, намачивание семян ели в воде уже в течение 1-х суток меняет содержание химических элементов в эндосперме. При активации процессов набухания увеличивается зародыш, происходит его развитие с дифференциацией на первичные органы. При обработке семян ОПВ эти процессы происходят существенно быстрее, результатом чего является повышение всхожести семян и более энергичное и раннее их прорастание.

Выводы

1. При намачивании семян в обработанной плазмой воде энергия прорастания увеличилась на 20–31 % для сосны и на 6–18 % для ели.
2. При намачивании в обработанной плазмой воде техническая всхожесть семян сосны увеличилась на 11–21 %, ели – на 3–16 %.
3. Соотношение химических элементов в эндосперме семян, намоченных в течение суток в воде, и в сухих семенах существенно отличается, увеличиваясь при намачивании для углерода на 2–3 % и уменьшаясь для кислорода на 1 %, а для калия – на 0,5 %.
4. При намачивании семян в дистиллированной воде содержание в эндосперме фосфора уменьшается на 0,15 %, а содержание натрия – на 0,2 %. Тогда как для семян, намоченных в обработанной плазмой воде, содержание фосфора снижается на 0,21–0,22 %, а содержание натрия не фиксируется.
5. Намачивание семян в обработанной плазмой воде стимулирует процессы их подготовки к прорастанию и дифференциации тканей зародыша.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Гостев К.В., Гаврилова О.И., Гостев В.А. Применение холодного плазменного спрея для предпосевной подготовки семян сосны обыкновенной // Вестник МГУЛ – Лесн. вестн. 2014. Т. 18, № 1. С. 90–96.
Gostev K.V., Gavrilova O.I., Gostev V.A. Application of Cold Plasma Spray for Pre-sowing Preparation of Scots Pine Seeds. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2014, vol. 18, no. 1, pp. 90–96. (In Russ.).
2. Гостев К.В., Штыков А.С., Васильев А.С. О потенциале использования низкотемпературной плазмы в промышленности и социальной сфере // Инж. вестн. Дона. 2017. № 3. С. 9.
Gostev K.V., Shtykov A.S., Vasiliev A.S. On the Potential of Using Low-temperature Plasma in Industry and Social sphere. *Inzhenernyy vestnik Dona* = Engineering Bulletin of the Don, 2017. no. 3, 9 p. (In Russ.).
3. Жигунов А.В. Посадочный материал с закрытой корневой системой // Лесн. хоз-во. 1995. № 4. С. 33–38.
Zhigunov A.V. Closed Root Planting Material. *Lesnoye khozyaystvo* = Forestry, 1995, no. 4, pp. 33–38. (In Russ.)
4. Касимов А.К. Развитие корневой системы сосны в посадках и посевах при механической обработке почвы // Изв. вузов. Лесн. журн. 1995. № 2-3. С. 30–38.
Kasimov A.K. The Development of the Pine Root System in Plantings and Crops Under Mechanical Soil Cultivation. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 1995, no. 2–3, pp. 30–38. (In Russ.).
5. Маркова И.А., Жигунов А.В. Специфика использования посадочного материала в различных подзонах бореальных лесов // Лес, окружающая среда и новые технологии в Северной Европе: докл. междунар. конф., Петрозаводск, сент. 1993 г. Йоэнсуу: Ун-т Йоэнсуу, 1994. № 17. С. 432–433.
Markova I.A., Zhigunov A.V. Specificity of Using Planting Material in Various Subzones of Boreal Forests. *Dokl. international conf. Forest, environment and new technologies in Northern Europe*. Petrozavodsk, 1993. Ed. Universitet Joensuu, no. 17., 1994, pp. 432–433. (In Russ.).

6. Наквасина Е.Н. О ритмах питания однолетних сеянцев ели в лесном питомнике // Изв. вузов. Лесн. журн. 1979. № 2. С. 12–16.

Nakvasina E.N. On the Feeding Rhythms of Annual Spruce Seedlings in a Forest Nursery. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 1979, no. 2, pp. 12–16.

7. Новосельцева А.И., Родин А.Р. Справочник по лесным питомникам. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 280 с.

Novoseltseva A.I., Rodin A.R. *Handbook of Forest Nurseries*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1983. 280 p. (In Russ.).

8. Патент 131931 U1 РФ, МПК 2013.08 H05H 1/24 (2006.01). Импульсный генератор переохлажденной плазмы: № 2013110894/07: заявл. 13.03.2013; опубл. 27.08.2013, бюл. № 24 / К.В. Гостев, А.А. Тихомиров, Е.А. Тихонов; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Плазмасфера».

Gostev K.V., Tikhomirov A.A., Tikhonov E.A. *Pulse Generator of Supercooled Plasma*. Patent RF, no. RU 131931, 2013. (In Russ.).

9. Юрьева А.Л., Гаврилова О.И., Хлюстов В.К. Динамика формирования надземной части культур сосны в период ранней диагностики // Тр. лесонинж. фак. ПетрГУ. 2008. № 7. С. 149–151.

Yurieva A.L., Gavrilova O.I., Khlyustov V.K. *Dynamics of the Formation of the Aboveground Part of Pine Crops During the Early Diagnosis*. Petrozavodskiy gosudarstvennyy universitet = Proceedings of the Faculty of Forestry and Engineering, 2008, no. 7, pp. 149–151. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j2.art.2008.1871>

10. Akimov R.Yu., Ostroshenko V.V. The Seed Pelleting of Korean Cedar Pine (*Pinus koraiensis* Siebold et Zucc.) and Amur Larch (*Larix amurensis*). *Agrarnyy vestnik Primor'ya = Agrarian Bulletin of Primorye*, vol. 4, pp. 39–41. (In Russ.).

11. Bao D., Luoranen J., Lehto T., Himanen K., Silvennoinen M., Silvennoinen R., Repo T. Biophysical Changes in the Roots of Scots Pine Seedlings During Cold Acclimation and After Frost Damage. *Forest Ecology and Management*, 2019, vol. 431, pp. 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.04.008>

12. Goebel D.M., Forrester A.T. Plasma Studies on a Hollow Cathode, Magnetic Multipole Ion Source for Neutral Beam Injection. *Rev. Sci. Instrum*, 1982, vol. 53, iss. 6, pp. 810–815. <https://doi.org/10.1063/1.1137051>

13. Goebel D.M., Watkins R.M. High Current, Low Pressure Plasma Cathode Electron Gun. *Rev. Sci. Instrum*, 2000, vol. 71, iss. 2, pp. 388–398. <https://doi.org/10.1063/1.1150212>

14. Gushenets V.I., Oks E.M., Yushkov G.Yu., Rempe N.G. Current Status of the Plasma Emission Electronics. I. Basic Physical Processes. *Laser and Particle Beams*, 2003, vol. 21, iss. 2, pp. 123–138. <https://doi.org/10.1017/S0263034603212027>

15. Himanen K., Helenius P., Ylioja T., Nygren M. Intracone Variation Explains Most of the Variance in Picea Abies Seed Weight. Implications for Seed Sorting. *Canadian Journal of Forest Research*, 2016, vol. 46, no. 4, pp. 470–477. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0379>

16. Himanen K. Seed Quality Attributes in Seedling Production of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Dissertationes Forestales*, 2018, vol. 261, 74 p. <https://doi.org/10.14214/df.261>

17. Lilja A., Himanen K. *Other Seed and Cone Diseases*. The American Phytopathology Society, 2018.

18. Miransari M., Smith D.L. Plant Hormones and Seed Germination. *Environmental and Experimental Botany*, 2014, vol. 99, pp. 110–121. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.11.005>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article