

Научная статья

УДК 582.475:58.036.5:630\*232.32

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-6-92-105

## Морозоустойчивость контейнерных сеянцев сосны обыкновенной в условиях высоких широт

**Н.П. Чернобровкина**, д-р биол. наук, доц.; ResearcherID: [K-6120-2018](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9716-003X>

**Е.В. Робонен**, науч. сотр.; ResearcherID: [AAD-1958-2019](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7926-8672>

**А.В. Егорова**, канд. с.-х. наук, мл. науч. сотр.; ResearcherID: [K-6095-2018](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1691-1269>

**К.Г. Нелаева**, аспирант; ResearcherID: [GYJ-7223-2022](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3283-4451>

**Е.А. Копосова**, стажер-исследователь; ResearcherID: [ODM-1685-2025](#),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1804-9042>

Институт леса КарНЦ РАН, ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Россия, 185910; chernobrovkina50@bk.ru, er51@bk.ru, egorova.anast@mail.ru, nelaevakg@krc.karelia.ru, elena-kpv@yandex.ru

---

Поступила в редакцию 18.10.24 / Одобрена после рецензирования 26.11.24 / Принята к печати 28.11.24

---

**Аннотация.** Совершенствуется технология производства посадочного материала с закрытой корневой системой основных лесообразующих пород с использованием многоротационного режима выращивания. В лесных питомниках подзоны среднетаежных лесов России с коротким вегетационным периодом затруднено внедрение такого режима из-за риска неподготовленности сеянцев к пересадке на лесокультурную площадь, низкой стрессоустойчивости. По окончании вегетационного периода в ноябре 2023 г. проводили сравнительный анализ 1-летних контейнерных сеянцев *Pinus sylvestris* L. при безротационном (0rot), а также 2-ротационном (2rot) режимах выращивания в условиях северных широт. Опытный вариант 1rotT отличался от 1rot (1-ротационный режим) использованием затеняющей сетки. У сеянцев определяли морфометрические показатели, обеспеченность основными элементами минерального питания (N, P, K). Исследовали динамику индекса повреждения мембран клеток хвои низкими температурами в осенний период при переходе растения от вегетации к состоянию покоя. Морфометрические показатели у сеянцев 2rot, за исключением диаметра стволика, были ниже, чем у сеянцев других вариантов, и не соответствовали стандартным. Хвоя и стебли сеянцев 2rot отличались от всех вариантов повышенными уровнями азота и калия, а также фосфора в стеблях по сравнению с вариантами 0rot и 1rotT. В отличие от других вариантов их хвоя имела ярко-зеленую окраску, у них не была сформирована верхушечная почка. Хвоя сеянцев всех режимов выращивания в 1-й декаде сентября была устойчива к низким температурам лишь до  $-4^{\circ}\text{C}$ . Морозоустойчивость хвои сеянцев повышалась и в 3-й декаде октября во всех вариантах, кроме 2rot, хвоя не повреждалась даже при  $-25^{\circ}\text{C}$ . Сеянцы 2rot отличались от других вариантов пониженной морозоустойчивостью хвои со 2-й декады сентября. Учитывая возможность заморозков в осенний период, существует риск повреждения сеянцев 2rot.

**Ключевые слова:** *Pinus sylvestris*, сеянцы, морфометрические показатели сеянцев, химические показатели сеянцев, морозоустойчивость, высокие широты

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 23-26-00192, <https://rsrf.ru/project/23-26-00192/> и за счет финансирования по теме госзадания ИЛ КарНЦ РАН на научном оборудовании ЦКП ФИЦ КарНЦ РАН.

**Для цитирования:** Чернобровкина Н.П., Робонен Е.В., Егорова А.В., Нелаева К.Г., Копосова Е.А. Морозоустойчивость контейнерных сеянцев сосны обыкновенной в условиях высоких широт // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 6. С. 92–105.

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-92-105>

Original article

## Frost Resistance of Containerized Scots Pine Seedlings in High Latitudes

**Nadezhda P. Chernobrovkina**✉, Doctor of Biology, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [K-6120-2018](https://orcid.org/0000-0002-9716-003X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9716-003X>

**Elena V. Robonen**, Research Scientist; ResearcherID: [AAD-1958-2019](https://orcid.org/0000-0002-9716-003X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7926-8672>

**Anastasiya V. Egorova**, Candidate of Agriculture, Junior Research Scientist;

ResearcherID: [K-6095-2018](https://orcid.org/0000-0002-1691-1269), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1691-1269>

**Karina G. Nelaeva**, Postgraduate Student; ResearcherID: [GYJ-7223-2022](https://orcid.org/0000-0002-3283-4451),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3283-4451>

**Elena A. Koposova**, Intern-Researcher; ResearcherID: [ODM-1685-2025](https://orcid.org/0009-0005-1804-9042),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1804-9042>

Forest Research Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, ul. Pushkinskaya, 11, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation; [chernobrovkina50@bk.ru](mailto:chernobrovkina50@bk.ru)✉, [er51@bk.ru](mailto:er51@bk.ru), [egorova.anast@mail.ru](mailto:egorova.anast@mail.ru), [nelaevakg@krc.karelia.ru](mailto:nelaevakg@krc.karelia.ru), [elena-kpv@yandex.ru](mailto:elena-kpv@yandex.ru)

Received on October 18, 2024 / Approved after reviewing on November 26, 2024 / Accepted on November 28, 2024

**Abstract.** The technology for producing planting stock with a closed root system of the main forest-forming species using a multi-rotation cultivation mode is being improved. In forest nurseries of the middle taiga forest subzone of Russia with a short growing season, the introduction of such a regime is difficult due to the risk of seedlings being unprepared for transplantation to a planting area and low stress resistance. At the end of the growing season in November 2023, a comparative analysis of 1-year-old containerized seedlings of *Pinus sylvestris* L. was carried out under non-rotation (0rot) and 2-rotation (2rot) cultivation modes in northern latitudes. The experimental 1rotT variant has differed from the 1rot (1-rotation mode) by the use of a shade cloth. Morphometric parameters and the provision of basic mineral nutrients (N, P, and K) have been determined in seedlings. The dynamics of the index of damage to pine needle cell membranes by low temperatures in the autumn period during the transition of the plant from vegetation to dormancy has been studied. The morphometric parameters of the 2rot seedlings, with the exception of the stem diameter, have been lower than those of the seedlings of other variants and have not corresponded to the standard ones. The needles and stems of 2rot seedlings have differed from all variants in increased levels of nitrogen and potassium, as well as phosphorus in the stems compared to the 0rot and 1rotT variants. Unlike other variants, their needles have been bright green and they had not had an apical bud. The needles of seedlings of all cultivation modes in the 1st ten days of September have been resistant to low temperatures only down to  $-4^{\circ}\text{C}$ . The frost resistance of seedling nee-

dles has increased and in the 3rd ten-day period of October in all variants except 2rot the needles have not been damaged even at  $-25^{\circ}\text{C}$ . The 2rot seedlings have differed from other variants in their reduced frost resistance of needles from the 2nd ten-day period of September. Considering the possibility of frosts in the autumn period, there is a risk of damage to 2rot seedlings.

**Keywords:** *Pinus sylvestris*, seedlings, morphometric parameters of seedlings, chemical indicators of seedlings, frost resistance, high latitudes

**Acknowledgements:** The study was carried out at the expense of the Russian Science Foundation grant no. 23-26-00192, <https://rscf.ru/project/23-26-00102/> and with funding under the state assignment for the Forest Research Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences using the scientific equipment of the Collective Use Centre of the Federal Research Centre “Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences”.

**For citation:** Chernobrovkina N.P., Robonen E.V., Egorova A.V., Nelaeva K.G., Koposova E.A. Frost Resistance of Containerized Scots Pine Seedlings in High Latitudes. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 6, pp. 92–105. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-92-105>

## Введение

В производстве посадочного материала с закрытой корневой системой основных лесообразующих пород в тепличных комплексах используется 2-ротационный режим выращивания, который позволяет в 2 раза повысить выход посадочного материала за 1 сезон [1–4, 11]. В лесных питомниках зоны среднетаежных лесов России с коротким вегетационным периодом затруднено внедрение такого режима в связи с риском неподготовленности сеянцев 2-й ротации к стрессовым ситуациям осенне-зимне-весеннего периода при пересадке на лесокультурную площадь. Необходимо исследование стрессоустойчивости контейнерных сеянцев хвойных пород при 2-ротационном выращивании в условиях короткого вегетационного периода высоких широт.

Для оценки потенциала ростовой и адаптационной активностей сеянцев древесных растений используют морфометрические, химические и физиологические показатели [7, 11, 26, 29]. Для отдельных регионов РФ регламентированы минимальные высота сеянцев и диаметр у корневой шейки (приказ Мин-ва природ. ресурсов и экологии РФ от 29.12.2021). Для более полной оценки качества контейнерных сеянцев древесных растений широко используются интегральные критерии качества, включающие 2 и более морфометрических показателя [7]. Химические характеристики сеянцев указывают на обеспеченность их элементами минерального питания по валовому химическому составу хвои (листьев) [6].

Морозоустойчивость является значимым физиологическим критерием качества сеянцев хвойных пород, определения оптимальных сроков посадки на лесокультурную площадь [17, 23, 35, 40]. При оценке сохранности контейнерных сеянцев ели европейской (*Picea abies* (L.) Karst.) и сосны обыкновенной в морозильной камере при  $-4^{\circ}\text{C}$  в течение зимнего периода и оценке их жизнеспособности после хранения проведено сравнение 2 методов исследования: измерения морозоустойчивости сеянцев и их массы [29]. Отмечаются преимущества учета морозоустойчивости для прогнозирования выживания и успешности роста сеянцев хвойных после длительного хранения при низких температурах и отсутствии освещения.

Формирование морозоустойчивости растений сопряжено со снижением и затем прекращением роста, образованием верхушечной почки, на которые влияет совокупность факторов окружающей среды – продолжительность светового периода, температура воздуха и почвы [20, 21, 24, 28]. Повреждение растений заморозками происходит в результате сложного взаимодействия, включающего минимальную температуру, количество циклов замораживания и оттаивания, их скорость [30]. Низкие температуры могут оказывать отрицательное действие как непосредственно на состояние клеточных мембран органов и тканей растения, так и косвенно путем влияния на их водный статус, становиться причиной фото-повреждений и фото-ингибиции. Для различных древесных пород и разного возраста морозоустойчивость неодинакова [15, 16, 33, 34], что обусловлено физиологическими механизмами, характерными для каждого вида и экотипа [27, 37, 39]. Восприимчивость растений к морозам различается в зависимости от климатических условий места происхождения [32].

Первичными участками повреждения низкими температурами являются клеточные мембранны, удерживающие электролиты внутри клеток (в большинстве – ионы металлов и внутриклеточные метаболиты), в результате клеточные мембранны теряют целостность, что позволяет электролитам просачиваться из клетки. Оценка повреждений клеток низкими температурами может быть произведена сравнением электропроводности водных экстрактов из тканей контрольного образца растения с водными экстрактами растений, которые подвергали температурным воздействиям различной интенсивности. Метод утечки электролитов является чувствительным, широко используется в мировой практике и имеет множество вариантов реализации при едином общем принципе. Метод применяли для диагностики приживаемости после пересадки сеянцев сосны алеппской (*Pinus halepensis* Mill.) [35]. Переход растений в состояние покоя сопровождается повышением морозоустойчивости, тогда как выход из него весной и начало активного роста влекут за собой ее снижение, поэтому ранние осенние и поздние весенние заморозки могут быть губительны для растений.

Цель работы – исследование формирования морозоустойчивости контейнерных сеянцев сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. 2-ротационного выращивания в условиях высоких широт с использованием морфометрических, химических и физиологических показателей.

#### *Объекты и методы исследования*

Эксперимент по 2-ротационному режиму выращивания контейнерных сеянцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях короткого вегетационного периода проводили в 2023 г. на территории Республики Карелия на базе тепличного комплекса «Вилга» ( $61^{\circ}49' с. ш.$   $34^{\circ}04' в. д.$ ). При посеве использовали семена сосны обыкновенной 1-го класса качества (ГОСТ 14161–86), полученные в Медвежьегорском центральном лесничестве ( $62^{\circ}90' с. ш.$   $34^{\circ}45' в. д.$ ).

Контрольный вариант (0rot) выращивали по стандартной агротехнике [8]. Опытные варианты: 1-ая ротация (1rot) и 2-я ротация (2rot) – отличались от контрольного сроками посева в закрытом грунте и перевода в открытый грунт (табл. 1). При выращивании сеянцев без ротаций (0rot) семена высевали 15 мая и выносили сеянцы на площадку закаливания 15 сентября. Посев семян 1rot и 2rot проводили соответственно 15 апреля и 25 июня 2023 г., вынос

на открытую площадку осуществляли соответственно 20 июня и 15 сентября. Опытный вариант 1rotT отличался от 1rot использованием на площадке закаливания затеняющей сетки (ООО «Рассадатара», Россия) на 55 дней – с 28 июня по 22 августа 2023 г. Сетка способствовала созданию условий, приближенных к условиям теплицы – повышению влажности воздуха и почвы, концентрации  $\text{CO}_2$ , снижению амплитуды перепада температур.

Таблица 1

**Экспериментальная схема выращивания 1-летних контейнерных сеянцев *Pinus sylvestris* в 2023 г.**  
**The experimental design for growing 1-year-old containerized *Pinus sylvestris* seedlings in 2023**

Вариант	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Вегетационный сезон	Продолжительность выращивания	
	закрытый грунт/открытый грунт, дни							дни	%
0rot	0/0	17/0	30/0	31/0	31/0	14/16	123/16	139	100
1rot	16/0	31/0	19/11	0/31	0/31	0/30	66/103	169	122
1rotT	16/0	31/0	19/11	0/31	0/31	0/30	66/103	169	122
2rot	0/0	0/0	6/0	31/0	31/0	14/16	82/16	98	71

Сеянцы сосны 0rot выращивали в течение 139 дней, из них 123 дня – в условиях теплицы. Сеянцы вариантов 1rot и 1rotT выращивали по одной схеме – 169 дней, из них 66 дней – в теплице. Период выращивания сеянцев 2rot составил 98 дней, в условиях теплицы – 82 дня. Для количественного сравнения режимов выращивания общую продолжительность выращивания сеянцев 0rot принимали за 100 % (сезон). Общую продолжительность выращивания за сезон в каждом варианте выражали как долю (%) от 0rot (от сезона). При 1rot и 2rot значения составили соответственно 122 и 71 %.

*Морфометрические методы.* В ноябре 2023 г. определяли морфометрические показатели сеянцев сосны вариантов: 1rot, 1rotT, 2rot, 0rot. В каждом варианте случайнным образом отбирали по 30 сеянцев, промывали корневую систему. Изменили длину надземной части от корневой шейки до основания терминальной почки (SH) и диаметр стволика у основания корневой шейки (RCD) (далее – стволика). Каждый сеянец разделяли на органы, устанавливали гравиметрическим методом сырью массу сеянца (TWM), надземной части (SWM), хвои (NWM), стволика (STWM), почек (BWM) и корней (RWM), определяли их влажность (%) и рассчитывали сухую массу (соответственно TDM, SDM, NDM, STDM, BDM и RDM).

*Химические методы.* В ноябре 2023 г. хвою сеянцев 4 вариантов эксперимента подвергали лиофильной сушке (лиофильная сушилка ЛС1000, Россия). Проводили анализ хвои на элементный состав в 3-кратной биологической повторности. Содержание общего азота определяли на CHNS-анализаторе (PerkinElmer's 2400 Series II CHNS/O, США); фосфора – по цветной реакции с молибдатом аммония со спектрофотометрическим окончанием (Спектрофотометр СФ-2000, Россия), калия – атомно-эмиссионным методом (Shimadzu AA 7000, Япония).

*Определение морозоустойчивости хвои контейнерных сеянцев сосны.* В период завершения вегетационного сезона 2023 г. (сентябрь–октябрь) исследовали процесс формирования морозоустойчивости сеянцев. Уровень морозоустойчивости оценивали кондуктометрическим методом утечки электролитов через клеточные мембранны хвои после низкотемпературного воздействия. За-

меры проводили подекадно по всем вариантам эксперимента. В каждую дату испытывали воздействие нескольких температур. Их диапазоны составили от  $-4\dots-20$  °C в начале сентября до  $-8\dots-25$  °C в конце октября. Сдвиг используемых в эксперименте температур в сторону понижения от сентября к октябрю был обусловлен уменьшением температур, при которых происходил полный выход электролитов из клеток хвои.

Степень повреждения клеточных мембран в различных вариантах оценивали по «индексу повреждения» ( $It$ ), рассчитываемому по формуле [22]:

$$It = 100 \times \left( \frac{ECf}{ECk} - \frac{ECc}{ECk} \right) / \left( 1 - \frac{ECc}{ECk} \right),$$

где  $ECf$  – электропроводность опытных растворов после экстрагирования навески, мСм·см $^{-1}$ ;  $ECc$  – электропроводность контрольных растворов после экстрагирования навески, мСм·см $^{-1}$ ;  $ECk$  – электропроводность растворов после автоклавирования с последующим экстрагированием (общая электропроводность), мСм·см $^{-1}$ .

Математическую обработку данных проводили с использованием пакетов программ Microsoft Excel и Statistica. Результаты представлены в виде диаграмм, построенных по средним арифметическим значениям экспериментальных данных. Данные проанализированы с применением однофакторного дисперсионного анализа для выявления различий средних параметров режимов выращивания при 3–5 биологических повторностях. Тест Тьюки использовали при парных сравнениях (как апостериорный тест) режимов выращивания. Достоверность различий проверена на уровне значимости 0,05.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

**Морфометрические показатели сеянцев.** Исследование контейнерных сеянцев сосны 4 вариантов эксперимента позволило выявить, что по морфометрическим показателям (SH, RSD, TDM, SDM, NDM, BDM, SQ) сеянцы вариантов эксперимента 0rot и 1rot были близки (табл. 2).

Таблица 2

**Морфометрические показатели контейнерных сеянцев *Pinus sylvestris* в 2023 г.  
The morphometric parameters of containerized *Pinus sylvestris* seedlings in 2023**

Показатель	0rot	1rot	1rotT	2rot	F (p)
SH, см	16,9±0,2 a	17,9±0,4 a	21,7±0,2 c	7,3±0,1 b	177 (<0,05)
RCD, мм	3,0±0,4 ab	2,8±0,4 ab	4,2±0,3 b	2,0±0,2 c	71 (<0,05)
TDM, г	1,3±0,4 a	1,2±0,3 a	1,5±0,2 c	0,5±0,1 b	69 (<0,05)
SDM, г	0,8±0,2 a	0,9±0,2 a	1,1±0,2 c	0,3±0,1 b	70 (<0,05)
NDM, г	0,5±0,2 a	0,5±0,1 a	0,6±0,1 c	0,3±0,1 b	32 (<0,05)
SBDM, г	0,3±0,1 b	0,4±0,2 c	0,5±0,1 d	0,1±0,02 a	74 (<0,05)
RDM, г	0,5±0,1 c	0,3±0,1 a	0,4±0,1 a	0,2±0,04 b	57 (<0,05)
BDM, мг	1,2±0,5 a	1,1±0,4 a	1,2±0,4 a	0,3±0,1 b	35 (<0,05)
SQ	1,2±0,3 a	1,3±0,2 ab	1,3±0,2 b	0,7±0,1 c	63 (<0,05)
SRR	1,7±0,4 b	2,6±0,6 a	2,6±0,4 a	2,2±0,6 c	24 (<0,05)
DQI	0,2±0,1 b	0,1±0,04 a	0,2±0,03 ab	0,1±0,02 c	28 (<0,05)

Примечание: Разные буквы указывают на достоверную разницу между вариантами, оцененную с помощью теста Тьюки. Df = 119.

По высоте (17–22 см) и диаметру стволика (2,8–3,2 мм) экземпляры этих вариантов и варианта 1rotT значительно превосходили стандартные сеянцы (соответственно на 8 см и 2 мм). Повышенные биометрические показатели (SH, RSD, TDM, SDM, NDM, SBDM) отмечены для сеянцев варианта 1rotT. Все морфометрические показатели у сеянцев 2rot были достоверно ниже, чем в контроле и в вариантах 1rot и 1rotT. Высота сеянцев 2rot не достигала стандартных размеров (6 см), в отличие от диаметра стволика (2 мм). По интегральным коэффициентам качества (SQ, DQI) сеянцы 2rot также характеризовались пониженным уровнем, за исключением показателя SRR, выражающего отношение масс надземной части к подземной, который у сеянцев 2rot был достоверно выше варианта 0rot, но ниже, чем у сеянцев 1rot и 1rotT.

*Элементный состав сеянцев.* В хвое сеянцев всех вариантов эксперимента уровни азота были ниже рекомендуемых значений для закрытого грунта [6] (табл. 3). Обеспеченность фосфором и калием сеянцев всех вариантов, по данным исследования содержания элементов в хвое, превосходила средний и высокий уровни рекомендуемых значений [6]. Сопоставление элементного состава сеянцев по органам показало, что хвоя сеянцев 2rot достоверно отличалась от других вариантов повышенным уровнем азота и калия, стебли сеянцев 2rot превосходили другие варианты по содержанию азота, фосфора (кроме варианта 1rot) и калия. Корни сеянцев 2rot не выделялись среди других вариантов по количеству исследуемых элементов, за исключением увеличенного уровня азота по сравнению с вариантом 1rot.

Таблица 3

**Элементный состав органов контейнерных сеянцев *Pinus sylvestris*  
(% от сухой массы)**

**The elemental composition of the organs of containerized *Pinus sylvestris* seedlings  
(% of dry weight)**

Орган	Вариант	N	P	K
Хвоя	0rot	0,9±0,1 a	0,3±0,2 a	0,9±0,1 a
	1rot	0,7±0,02 a	0,2±0,1 a	0,9±0,04 a
	1rotT	0,9±0,2 a	0,3±0,1 a	0,9±0,2 a
	2rot	1,4±0,3 b	0,3±0,1 a	1,3±0,1 b
	F (p)	10 (<0,05)	1 (0,64)	10 (<0,05)
Стебли	0rot	0,4±0,1 a	0,2±0,1 a	0,9±0,1 a
	1rot	0,6±0,2 a	0,3±0,1 ab	0,9±0,04 a
	1rotT	0,6±0,2 a	0,2±0,1 a	0,8±0,1 a
	2rot	1,3±0,3 b	0,5±0,1 b	1,5±0,2 b
	F (p)	11 (<0,05)	8 (<0,05)	16 (<0,05)
Корни	0rot	0,9±0,2 ab	0,3±0,2 a	1±0,1 a
	1rot	0,6±0,1 a	0,3±0,2 a	0,7±0,1 a
	1rotT	0,9±0,3 ab	0,4±0,1 a	0,9±0,2 a
	2rot	1,2±0,3 b	0,2±0,1 a	0,9±0,1 a
	F (p)	4 (<0,05)	2 (0,2)	2 (0,2)

Примечание: Df = 11. Отбор сеянцев проводили 08.11.2023.

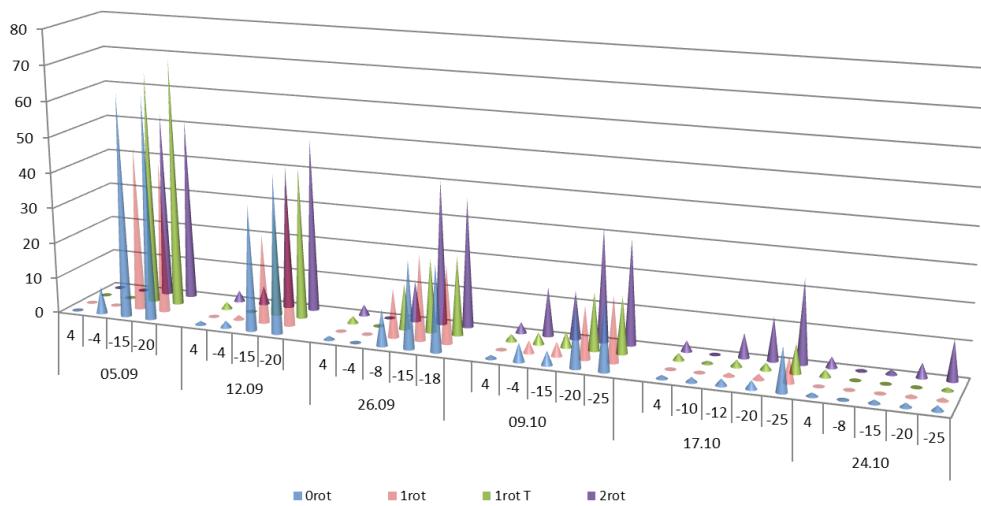
**Формирование морозоустойчивости сеянцев.** Исследование динамики индекса повреждения мембран клеток хвои низкими температурами в осенний период показало, что сеянцы всех режимов выращивания в 1-й декаде сентября были устойчивы к температурам до  $-4^{\circ}\text{C}$ , при понижении температуры до  $-15^{\circ}\text{C}$  у растений всех вариантов отмечался высокий индекс повреждения – до 70 % (табл. 4). В течение сентября и октября морозоустойчивость сеянцев всех вариантов увеличивалась, достигая максимума в 3-й декаде октября, когда хвоя сеянцев всех вариантов, кроме 2rot, не повреждалась даже при  $-25^{\circ}\text{C}$ . Сеянцы 2rot по сравнению с другими вариантами эксперимента отличались пониженной морозоустойчивостью хвои со 2-й декады сентября (см. рисунок).

Таблица 4

**Индексы повреждения клеточных мембран хвои контейнерных сеянцев *Pinus sylvestris* при воздействии низких температур в период формирования морозоустойчивости в сентябре–октябре 2023 г.**  
**The damage indices of cellular membranes of needles of containerized *Pinus sylvestris* seedlings when exposed to low temperatures during the period of frost resistance development in September–October 2023**

Дата	Температура, $^{\circ}\text{C}$	0rot	1rot	1rotT	2rot	F (p)
05.09	-4	7,7±0,4 b	0	0	0	111 (<0,05)
	-15	63,3±4,2 fgh	47,6±5,1 cde	65,8±6,2 cde	53,4±2,2 cdefg	
	-20	63,1±4,9 fgh	43,8±4,7 cd	70,1±3,4 h	51,9±2,0 cdef	
12.09	-4	2,0±0,2 b	1,2±0,0 b	0	5,2±1,2 b	79 (<0,05)
	-15	35,2±6,1 cde	25,1±1,6 c	0	40,2±3,2 def	
	-20	44,0±5,0 ef	40,5±3,0 def	42,6±6,5 def	49,0±2,8 f	
26.09	-8	7,6±1,5 b	12,6±2,0 b	13,1±1,6 b	11,4±4,0 b	90 (<0,05)
	-15	24,6±0,8 c	23,0±1,0 c	20,7±4,3 c	40,7±3,0 d	
	-18	24,1±1,9 c	20,8±0,8 c	22,3±3,4 c	36,3±1,5 d	
09.10	-4	5,3±0,7 a	3,4±0,2 a	3,4±0,6 a	13,6±3,4 b	94 (0,19)
	-15	3,9±0,4 a	4,0±0,9 a	4,4±0,1 a	13,4±2,0 b	
	-20	17,4±2,1 bcd	14,7±2,5 bc	16,1±2,6 bcd	31,6±2,6 e	
	-25	20,0±2,1 d	18,3±1,9 cd	15,8±2,3 bcd	29,4±2,2 e	
17.10	-10	1,5±0,5 ab	0,2±0,1 ab	0,7±0,0 ab	0	119 (<0,05)
	-12	1,9±0,8 b	0,9±0,1 ab	2,0±1,0 b	6,8±1,8 c	
	-20	2,4±0,9 b	1,5±0,2 ab	2,1±1,0 b	12,1±1,6 d	
	-25	12,3±1,8 d	7,0±0,9 c	8,1±0,6 c	23,2±2,1 e	
24.10	-8	0,4±0,1	0	0	3,3±0,3	42 (<0,05)
	-15	1,1±0,5	0,7±0,1	0	5,0±1,0	
	-20	1,2±0,4	0,6±0,3	0	4,1±0,6	
	-25	2,9±0,8	0	0,4±0,4	11,3±2,1	

Примечание: Df = 79.



Индексы повреждения клеточных мембран хвои контейнерных сеянцев *Pinus sylvestris* при воздействии низких температур ( $-4\ldots-25^{\circ}\text{C}$ ) в период формирования морозоустойчивости (сентябрь–октябрь 2023) в зависимости от вариантов режима выращивания

The damage indices of cellular membranes of needles of containerized *Pinus sylvestris* seedlings when exposed to low temperatures ( $-4\ldots-25^{\circ}\text{C}$ ) during the period of frost resistance development (September–October 2023) depending on the cultivation mode variant

Количественные показатели биомассы сеянца и его органов в конце вегетационного периода характеризуют ростовую активность растения в течение вегетационного периода. Условия и продолжительность выращивания сеянцев вариантов эксперимента 0rot, 1rot, 1rotT способствовали тому, что по высоте и диаметру стволика они значительно превосходили установленные по региону размеры стандартных сеянцев. Повышенный по сравнению с другими вариантами уровень морфометрических показателей (SH, RSD, TDM, SDM, NDM, SBDM) у сеянцев варианта 1rotT обусловлен более длительным периодом выращивания и условиями, приближенными к условиям теплицы, которые способствовали ускоренному росту надземных органов сеянцев. Повышенный SRR у всех экспериментальных сеянцев по сравнению с вариантом 0rot позволяет прогнозировать их менее успешное выживание при высадке на лесокультурную площадь.

Достоверно низкие по сравнению с другими вариантами морфометрические показатели у сеянцев 2rot обусловлены менее длительным выращиванием на протяжении сезона. Высота сеянцев варианта 2rot не достигала стандартных размеров. Исследования, проведенные в Ленинградской области, также позволили выявить, что для получения стандартных сеянцев сосны и ели 2rot (посев 24 июня) необходимо их добрачивание во 2-м вегетационном сезоне [10].

Химический состав хвои является чувствительным индикатором обеспеченности древесных растений элементами минерального питания [12]. На разных этапах развития сеянцы испытывают потребность преимущественно в определенном элементе питания. Так, в фазу начального роста им необходимо больше фосфора, в период усиленного роста – азота, тогда как после окончания роста надземной части – калия [5]. По результатам данного эксперимента хвоя сеянцев всех вариантов характеризовалась низким уровнем азота по сравнению с реко-

мендуемыми значениями для данного региона, что можно объяснить «эффектом разбавления» у сеянцев вариантов 0rot, 1rot и 1rotT с большой биомассой, превышающей рекомендуемую. Несмотря на большую биомассу сеянцев этих вариантов, уровни фосфора и калия в хвое оказались выше рекомендуемых. Показано, что сеянцы ели ситхинской (*Picea sitchensis*) с увеличенным содержанием фосфора были менее устойчивы к ранним осенним заморозкам по сравнению с сеянцами с более низким содержанием элемента [31]. А осенние подкормки азотом сеянцев сосны смолистой (*Pinus resinosa* Ait.) способствовали росту стволика и усилению морозоустойчивости после 1-го вегетационного периода [25].

Хвоя и стебли сеянцев 2rot отличались от всех вариантов повышенным уровнем азота и калия, а также фосфора в стеблях по сравнению с вариантами 0rot и 1rotT. В отличие от других вариантов их хвоя имела ярко-зеленую окраску, без характерного для осенне-зимнего периода пурпурного оттенка, у них не была сформирована верхушечная почка. Данные указывают на то, что сеянцы 2rot в отличие от других вариантов не закончили развитие с завершением вегетационного периода. Показано, что чем дальше сдвигаются сроки посева, тем больше требуется времени, чтобы после наступления критической длины дня, при которой начинается фото-ингибирование роста эпикотиля, запустились процессы формирования почки [10]. Отсутствие сформированной почки у сеянцев не является фатальным для возобновления роста в весенний период. Разработана технология круглогодичного выращивания сеянцев древесных пород, в т. ч. хвойных, при которой сеянцы выращиваются в течение 2–5 недель в малообъемных кассетах в условиях светоустановки, далее хранятся в морозильной камере при температуре от –2 до –4 °C в течение 2–6 месяцев [36]. По мере производственной необходимости сеянцы помещают в оптимальные условия, и они возобновляют свой рост.

Значимым показателем качества сеянцев является морозоустойчивость, определяющая выживание растений при понижении температур. Ответную реакцию растения на пониженные температуры изучают по различным физиологико-биохимическим характеристикам: интенсивность роста, уровень хлорофилла, скорость фотосинтеза и транспирации, относительное содержание воды в тканях, относительный выход электролитов, интенсивность перекисного окисления липидов [13]. Метод утечки электролитов является чувствительным, успешно применяется в лесоводстве для оценки морозоустойчивости различных видов и генотипов древесных растений и имеет множество вариантов реализации при едином общем принципе [14, 18, 33, 35, 38]. Мониторинг индекса повреждения мембран клеток хвои низкими температурами в сентябре–октябре позволил выявить динамику формирования морозоустойчивости у контейнерных сеянцев сосны 4 вариантов эксперимента в осенний период, в фазу закаливания, когда осуществляется переход растения от вегетации к состоянию покоя. Низкие температуры вызывают множество физиологических реакций у растений, которые способствуют формированию адаптационных механизмов, обеспечивающих их холодо- и морозоустойчивость [9, 38].

Сеянцы 2rot по сравнению с другими вариантами эксперимента отличались пониженной морозоустойчивостью хвои в период исследования со 2-й декады сентября, что обусловлено непродолжительным периодом их выращивания. В хвое сеянцев варианта 2rot в конце октября индекс повреждения (при –25 °C) составлял 11,2 %, это может указывать на недостаточную подготовленность сеянцев к зиме. Существует риск их повреждения в октябре, учитывая

возможность заморозков в условиях северных широт в данный период. Успешность сохранения посадочного материала в зимнее время существенно зависит от погодных условий и наличия снежного покрова. Во избежание рисков повреждения сеянцев в зимний период в практике питомнических хозяйств используется хранение сеянцев в морозильных камерах с поддержанием температуры от  $-3$  до  $-5$   $^{\circ}\text{C}$  [19]. Низкая морозоустойчивость у контейнерных сеянцев сосны обыкновенной и ели европейской, выявленная при закладке на хранение в морозильные камеры, коррелировала с большой гибелью растений в teste на выращивание после хранения [29]. По наблюдениям авторов сеянцы сосны и ели можно считать подготовленными к зимнему хранению в морозильных камерах ( $-3\ldots-5$   $^{\circ}\text{C}$ ), если у верхушечной части побега индекс повреждения при температуре  $-25$   $^{\circ}\text{C}$  не превышает 4 %.

### Заключение

Показано формирование морозоустойчивости хвои контейнерных сеянцев сосны обыкновенной в осенний период при безротационном (0rot), а также при внедряемом в условиях высоких широт 2-ротационном (2rot) режимах выращивания. Результаты исследования роста, элементного состава и устойчивости к низким температурам контейнерных сеянцев выявили проблему, которая связана с преимущественно низкими морфометрическими показателями сеянцев 2rot, не соответствующими стандарту и с пониженной морозоустойчивостью. Непродолжительный период выращивания отразился и на химическом составе органов – хвоя и стебли сеянцев 2rot отличались от остальных вариантов повышенными уровнями азота и калия, а также фосфора в стеблях по сравнению с вариантами 0rot и 1rotT (1-ротационный режим с затеняющей сеткой). Хвоя сеянцев 2rot имела ярко-зеленую окраску без характерного для морозоустойчивых сеянцев пурпурного оттенка, у них не была сформирована верхушечная почка. Данные указывают на то, что сеянцы 2rot в отличие от других вариантов не остановились в развитии с окончанием вегетационного периода. С целью повышения качества сеянцев 2rot целесообразно испытание при их выращивании регуляторов роста, стимулирующих развитие в высоту и увеличение устойчивости к низким температурам. Устранение проблемы при выращивании сеянцев 2rot возможно подбором оптимальных сроков посева семян, удлинением периода вегетации и урегулированием обеспечения элементами питания. Предлагается также проверить морозоустойчивость сеянцев 2rot не только по индексу повреждения мембран клеток хвои, но и испытав интактное растение в условиях климатокамеры. Исследования в этом направлении необходимы для успешного лесовосстановления, а также для прогнозирования выживания хвойных растений на ювенильной стадии развития в условиях меняющегося климата.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бобушкина С.В. Приемы повышения эффективности производства посадочного материала хвойных пород с закрытой корневой системой в Архангельской области // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2021. Т. 25, № 6. С. 45–54.

Bobushkina S.V. Efficiency Production Methods of Conifers Ball-Rooted Planting Stock in Arkhangelsk Region. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2021, vol. 25, no. 6, pp. 45–54. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-6-45-54>

2. Гаврилова О.И., Дмитриева М.И., Нелаева К.Г. Перспективы применения двухротационного выращивания сеянцев в питомниках Карелии //Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2023. № 64. С. 185–188.

Gavrilova O.I., Dmitrieva M.I., Nelaeva K.G. Prospects for the Application of Dual-Rotation Seedling Cultivation in Nurseries in Karelia. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2023, no. 64, pp. 185–188. (In Russ.).

3. Жигунов А.В. Теория и практика выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой. СПб.: СПб НИИЛХ, 2000. 293 с.

Zhigunov A.V. *Theory and Practice of Growing Planting Material with a Closed Root System*. St. Petersburg, Saint Petersburg Forestry Research Institute, 2000. 293 p. (In Russ.).

4. Мочалов Б.А., Бобушкина С.В. Выращивание посадочного материала закрытой корневой системой в Архангельской области // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2012. № 1. С. 79–83.

Mochalov B.A., Bobushkina S.V. The Growing of Containerized Seedlings in Arkhangelsk Region. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2012, no. 1, pp. 79–83. (In Russ.).

5. Наквасина Е.Н. Ритмика роста сеянцев сосны и ели. Биоэкологическое обоснование агротехники выращивания. Архангельск: Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова, 2016. 158 с.

Nakvasina E.N. *Rhythmic Growth of Pine and Spruce Seedlings. Bioecological Justification of Cultivation Techinques*. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov Publ., 2016. 158 p. (In Russ.).

6. Наставления по системам применения удобрений в лесном хозяйстве на европейской территории СССР. 25 сентября 1991 года.

*Guidelines for Fertilizer Application Systems in Forestry in the European Territory of the USSR. September 25, 1991.* (In Russ.).

7. Робонен Е.В., Чернобровкина Н.П., Егорова А.В., Зайцева М.И., Нелаева К.Г. Морфометрические критерии оценки качества контейнерных сеянцев хвойных пород // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 5. С. 42–57.

Robonen E.V., Chernobrovkina N.P., Egorova A.V., Zaitseva M.I., Nelaeva K.G. Morphometric Criteria for Assessing the Containerized Conifers Seedlings Quality. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 5, pp. 42–57. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-42-57>

8. Степанов С.А., Зайцева М.И. Выращивание и использование посадочного материала с закрытой корневой системой. Петрозаводск, 2015. 27 с.

Stepanov S.A., Zaitseva M.I. *Cultivation and Use of Planting Stock with a Closed Root System*. Petrozavodsk, 2015. 27 p. (In Russ.).

9. Тарханов С.Н., Пинаевская Е.А., Аганина Ю.Е., Пахов А.С. Изменчивость биохимических признаков *Pinus sylvestris* (Pinaceae) при адаптации форм в условиях избыточного увлажнения // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 4. С. 58–75.

Tarkhanov S.N., Pinaevskaya E.A., Aganina Y.E., Pakhov A.S. Variability of Biochemical Properties During Adaptation of *Pinus sylvestris* (Pinaceae) Forms to Excessive Moisture Conditions. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 4, pp. 58–75. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-58-75>

10. Федотов А.Н., Жигунов А.В. Влияние длины дня на формирование верхушечных почек у однолетних контейнеризированных сеянцев сосны обыкновенной и ели европейской // Изв. С.-Петербург. лесотехн. акад. 2016. Вып. 215. С. 80–91.

Fedotov A.N., Zhigunov A.V. The Effect of the Day Length on the Formation of Apical Buds in One-Year-Old Containerized Seedlings of Scots Pine and Norway Spruce. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhniceskoj akademii*, 2016, iss. 215, pp. 80–91. (In Russ.).

<https://doi.org/10.21266/2079-4304.2016.215.80-91>

11. Чернобровкина Н.П. Экофизиологическая характеристика использования азота сосновой обыкновенной. СПб.: Наука, 2001. 175 с.

Chernobrovkina N.P. *Ecophysiological Characteristics of Nitrogen Use by Scots Pine*. St. Petersburg, Nauka Publ., 2001. 175 p. (In Russ.).

12. Чурагулова З.С. Почвы лесных питомников Южного Урала и оптимизация их лесорастительных свойств: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Томск, 2004. 25 с.
- Churagulova Z.S. *Soils of Forest Nurseries in the Southern Urals and Optimization of Their Forest-Vegetation Properties*: Doc. Biol. Sci. Diss. Abs. Tomsk, 2004. 25 p. (In Russ.).
13. Шибаева Т.Г., Икконен Е.Н., Шерудило Е.Г., Титов А.Ф. Влияние ежесуточных кратковременных понижений температуры на теплолюбивые и холодостойкие растения // Физиология растений. 2019. Т. 66, № 4. С. 266–276.
- Shibaeva T.G., Ikkonen E.N., Sherudilo E.G., Titov A.F. Effects of a Daily Short-Term Temperature Drop on Chilling-Sensitive and Cold-Resistant Plants. *Fiziologiya rastenij* = Russian Journal of Plant Physiology, 2019, vol. 66, no. 4, pp. 266–276. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.1134/S0015330319040122>
14. Aronsson A., Eliasson L. Frost Hardiness in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). I. Conditions for Test on Hardy Plant Tissues and for Evaluation of Injuries by Conductivity Measurements. *Studia Forestalia Suecica*, 1970, no. 77, pp. 1–30.
15. Bannister P., Colhoun C.M., Jameson P.E. The Winter Hardening and Foliar Frost Resistance of Some New Zealand Species of *Pittosporum*. *New Zealand Journal of Botany*, 1995, vol. 33, pp. 409–414. <https://doi.org/10.1080/0028825X.1995.10412967>
16. Boorse G.C., Ewers F.W., Davis S.D. Response of Chaparral Shrubs to Below-Freezing Temperatures: Acclimation, Ecotypes, Seedlings vs. Adults. *American Journal of Botany*, 1998, vol. 85, iss. 9, pp. 1224–1230. <https://doi.org/10.2307/2446631>
17. Burr K.E., Tinus R.W., Wallner S.J., King R.M. Relationships among Cold Hardiness, Root Growth Potential and Bud Dormancy in Three Conifers. *Tree Physiology*, 1989, vol. 5, iss. 3, pp. 291–306. <https://doi.org/10.1093/treephys/5.3.291>
18. Climent J., Costa e Silva F., Chambel M.R., Pardos M., Almeida M.H. Freezing Injury in Primary and Secondary Needles of Mediterranean Pine Species of Contrasting Ecological Niches. *Annals of Forest Science*, 2009, vol. 66, art. no. 407.  
<https://doi.org/10.1051/forest/2009016>
19. Colombo S.J. Second-Year Shoot Development in Black Spruce *Picea mariana* (Mill.) B.S.P. Seedlings. *Canadian Journal of Forest Research*, 1986, vol. 16, no. 1, pp. 68–73. <https://doi.org/10.1139/x86-011>
20. Dormling I. Bud Dormancy, Frost Hardiness, and Frost Drought in Seedlings of *Pinus sylvestris* and *Picea abies*. *Advances in Plant Cold Hardiness*. Boca Raton, CRC Press, 1993, pp. 285–298. <https://doi.org/10.1201/9781351069526-20>
21. Ekberg I., Eriksson G., Dormling I. Photoperiodic Reactions in Conifer Species. *Ecography: A Journal of Space and Time in Ecology*, 1979, vol. 2, iss. 4, pp. 255–263. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.1979.tb01297.x>
22. Flint H.L., Boyce B.R., Beattie D.J. Index of Injury – A Useful Expression of Freezing Injury to Plant Tissues as Determined by the Electrolytic Method. *Canadian Journal of Plant Science*, 1967, vol. 47, no. 2, pp. 229–230. <https://doi.org/10.4141/cjps67-043>
23. Folk R.S., Grossnickle S.C., Axelrood P., Trotter D. Seed Lot, Nursery, and Bud Dormancy Effects on Root Electrolyte Leakage of Douglas-Fir (*Pseudotsuga menziesii*) Seedlings. *Canadian Journal of Plant Science*, 1999, vol. 29, no. 8, pp. 1269–1281.  
<https://doi.org/10.1139/x99-084>
24. Hannerz M., Westin J. Growth Cessation and Autumn-Frost Hardiness in One-Year-Old *Picea abies* Progenies from Seed Orchards and Natural Stands. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2000, vol. 15, iss. 3, pp. 309–317. <https://doi.org/10.1080/028275800447931>
25. Islam M.A., Apostol K.G., Jacobs D.F., Dumroese R.K. Fall Fertilization of *Pinus resinosa* Seedlings: Nutrient Uptake, Cold Hardiness, and Morphological Development. *Annals of Forest Science*, 2009, vol. 66, art. no. 704. <https://doi.org/10.1051/forest/2009061>
26. Krasowski M.J., Simpson D.G. Frost-Related Problems in the Establishment of Coniferous Forests. *Conifer Cold Hardiness*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2001, pp. 253–285. [https://doi.org/10.1007/978-94-015-9650-3\\_10](https://doi.org/10.1007/978-94-015-9650-3_10)

27. Larcher W. Climatic Constraints Drive the Evolution of Low Temperature Resistance in Woody Plants. *Journal of Agricultural Meteorology*, 2005, vol. 61, iss. 4, pp. 189–202. <https://doi.org/10.2480/agrmet.61.189>
28. Lavender D.P. *Environment and Shoot Growth of Woody Plants*. Corvallis, Oregon State University, Forest Research Lab, 1981. 47 p.
29. Lindström A., Stattin E., Gräns D., Wallin E. Storability Measures of Norway Spruce and Scots Pine Seedlings and Assessment of Post-Storage Vitality by Measuring Shoot Electrolyte Leakage. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2014, vol. 29, iss. 8, pp. 717–724. <https://doi.org/10.1080/02827581.2014.977340>
30. Livingston W.H. Taking Advantage of Mother Nature to Overwinter Woody Plants. *L'Hivernage des Plantes Ligneuses et des Vivaces Ornamentales. Proceedings of the Institut Québécois du Développement de L'Horticulture Ornamentales (IQDHO)*. Trois Rivières Que, 1995, pp. 269–278.
31. Malcolm D.C., Freezaillah B.C.Y. Early Frost Damage on Sitka Spruce Seedlings and the Influence of Phosphorus Nutrition. *Forestry*, 1975, vol. 48, iss. 2, pp. 139–145. <https://doi.org/10.1093/forestry/48.2.139>
32. Malmqvist C., Wallertz K., Johansson U. Survival, Early Growth and Impact of Damage by Late-Spring Frost and Winter Desiccation on Douglas-Fir Seedlings in Southern Sweden. *New Forests*, 2018, vol. 49, pp. 723–736. <https://doi.org/10.1007/s11056-018-9635-7>
33. Malmqvist C., Wallertz K., Lindström A. Storability and Freezing Tolerance of Douglas-Fir and Norway Spruce Seedlings Grown in Mid-Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2017, vol. 32, pp. 30–38. <https://doi.org/10.1080/02827581.2016.1183704>
34. Meza-Basso L., Guarda P., Rios D., Alberdi M. Changes in Free Amino Acid Content and Frost Resistance in *Nothofagus dombeyi* Leaves. *Phytochemistry*, 1986, vol. 25, iss. 8, pp. 1843–1846. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)81159-0](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)81159-0)
35. Pardos M., Royo A., Gil L., Pardos J.A. Effect of Nursery Location and Outplanting Date on Field Performance of *Pinus halepensis* and *Quercus ilex* Seedlings. *Forestry*, 2003, vol. 76, iss. 1, pp. 67–81. <https://doi.org/10.1093/forestry/76.1.67>
36. Radoglou K., Dini-Papanastasi O., Kostopoulou P., Spyroglou G. Forest Regeneration Material: State of the Art and a New European Approach for Pre-Cultivated Planting Stock Production. *Forestry in Achieving Millennium Goals*. Serbia, Novi Sad, 2008, vol. 1, pp. 23–29.
37. Repo T., Zhang G., Ryypö A., Rikala R., Vuorinen M. The Relation between Growth Cessation and Frost Hardening in Scots Pines of Different Origins. *Trees*, 2000, vol. 14, pp. 456–464. <https://doi.org/10.1007/s004680000059>
38. Ryypö A., Repo T., Vapaavuori E. Development of Freezing Tolerance in Roots and Shoots of Scots Pine Seedlings -at Nonfreezing Temperatures. *Canadian Journal of Forest Research*, 1998, vol. 28, no. 4, pp. 557–565. <https://doi.org/10.1139/x98-022>
39. Savolainen O., Bokma F., García-Gil R., Komulainen P., Repo T. Genetic Variation in Cessation of Growth and Frost Hardiness and Consequences for Adaptation of *Pinus sylvestris* to Climatic Changes. *Forest Ecology and Management*, 2004, vol. 197, iss. 1–3, pp. 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.05.006>
40. Simpson D.G. Frost Hardiness, Root Growth Capacity and Field Performance Relationships in Interior Spruce, Lodgepole Pine, Douglas-Fir, and Western Hemlock Seedlings. *Canadian Journal of Forest Research*, 1990, vol. 20, no. 5, pp. 566–572. <https://doi.org/10.1139/x90-073>

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest