

УДК (630\*232.312.3 + 630\*232.323.7) : 630\*232.32

**Т.П. Новикова, С.В. Ребко, Е.П. Петрищев, А.И. Новиков**

**РАННИЙ РОСТ КУЛЬТУР  
(*PINUS SYLVESTRIS L. VAR. NEGORELSKAYA*),  
ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ СЕМЯН  
С ИЗВЕСТНЫМИ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИМИ  
И МОРФОМЕТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ**

*Введение.* Для лесных вегетирующих растений, в частности, культур сосны обыкновенной сорта «Негорельская» [Поплавская и др., 2021], наиболее информативным этапом развития, на котором прослеживается отклик количественных [Новиков, 2019б] и качественных [Новиков, 2019а; Новикова, 2024] свойств лесных семян [Новиков, 2017], считается ювенильный этап, традиционно исчисляющийся от момента прорастания индивидуального семени [Новиков и др., 2023б] до момента первого цветения и характеризующийся образованием надземной части – листьев (игл, хвои), стеблей – и развитием ризосферы, оцениваемой, например, индексами качества Диксона DQI или качества корней RQI [Новиков и др., 2023а]. В научно-периодической литературе данный этап онтогенеза культуры [Дурова, Жигунов, 2017] достаточно часто терминологизируют как «ранний рост» («early growth»), оценивая уровень восприимчивости сеянца (саженца) к внешним физическим стрессорам биометрическим отношением В/Д (*Height-Diameter Ratio*) – высоты к диаметру стволика у корневой шейки [Петрищев, 2021; Новиков и др., 2023а; Egbäck et al., 2015; Nigul et al., 2021; Rodríguez de Prado et al., 2022; Novikova, 2023; Novikova et al., 2023; Santos et al., 2023]. В контексте данной статьи рассматривали ранний рост культур в стадии приживления – первом вегетационном периоде после пересадки на постоянное место.

Спектрометрические данные лесных семян в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн электромагнитного излучения, как подтверждают предыдущие исследования авторов для вида *Pinus sylvestris* L. [Новиков, 2018, 2021; Новиков и др., 2022; Novikov, Ivetic, 2019; Novikov et al., 2019, 2021; Novikova et al., 2023] и отмечают научно-исследовательские группы, достаточно эффективно могут дифференцировать провешиенции [Farhadi et al., 2015, 2017; Bacherikov et al., 2022], жизнеспособность и (или) хозяйственную пригодность [Прияткин, 2023; Tigabu, 2003; Daneshvar et al.,

2015;], виды семян [Farhadi et al., 2016], их зараженность вредителями [Tigabu et al., 2004] и болезнями [Bernardes et al., 2022], способность впитывать и терять воду [Gomes et al., 2024].

В связи с этим исследование предполагает установить некоторые закономерности раннего роста по показателю биометрического В/Д отношения трех групп (по времени пересадки) контейнерных саженцев относительно спектральных характеристик (VIS-регион | RGB-пространство) яркости индивидуальных семян сорта *Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya, зафиксированных в технологическом паспорте «семя – культура» [Новиков и др., 2023c; Новикова, 2024].

#### *Материалы и методы.*

*Сбор и подготовка лесосеменного материала.* *Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya является зарегистрированным сортом (свидетельство на сорт № 0003707, приоритет 28.03.2008, Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь), происхождение которого подробно представлено в работе [Ребко и др., 2024b]. Шишки собирали в декабре 2022 года с 18-летних клонов, произрастающих на гибридно-семенной плантации второго поколения ( $53^{\circ}63'`$ с.ш.,  $28^{\circ}55'`$ в.д., Негорельский учебно-опытный лесхоз – филиал Белорусского государственного технологического университета, Республика Беларусь; высота н.у.м. – 180 м). После сбора шишки подсушивали при нормальных условиях – температуре 20 градусов Цельсия и влажности не более 60% до момента раскрытия. Высыпавшиеся из шишек семена обескрывали сухим способом, затем подсушивали до влажности 5,8%. Пустые (легкие) семена аспирационно из партии не извлекали. Далее из подготовленной исходной лесосеменной партии (в табл. 1 приведены посевные качества), базируясь на методике квартования [Бачериков, 2017], случайным образом отбирали три группы (образца) семян в количестве 400 штук каждая для последующего морфометрического анализа. Более подробно процедура сбора и подготовки лесосеменного материала для исследования приведена в основной части статьи [Ребко и др., 2024a].

*Морфометрия лесосеменного материала.* Случайным образом отбирали семена по одному, присваивая каждому индивидуальный номер от 1 до 400. После присвоения порядкового номера каждое семя взвешивали с помощью аналитических весов (точность 0,0001 г) и измеряли длину, ширину и толщину с помощью цифрового штангенциркуля (точность 0,1 мм), фиксируя данные в наборе [Петрищев и др., 2023b]. Затем данное семя помещали в индивидуальный пронумерованный кармашек прозрачного 88-карманного

перфорированного листа для транспортировки к месту высевания. Далее для второго и третьего образцов повторяли вышеуказанные действия. Более подробно методика данного анализа рассмотрена в основной части работы [Ребко и др., 2024а], а в табл. 2 справочно приведены некоторые морфометрические параметры и средняя масса семени в каждой из групп.

Таблица 1

**Посевные качества исходной партии семян  
*Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya, отобранный для исследования**

**Sowing qualities of the initial seedlot of *Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya  
selected for this research**

Посевные качества					
масса 1000 семян, г		чистота семян, %	энергия прорастания, %	техническая всхожесть, %	средний семеной покой, дней
ГОСТ	ISTA				
6,39	6,45	96,0	80,0	88,0	5,5

Примечание: данные адаптированы из работы [Ребко и др., 2024а] и приведены справочно.

Таблица 2

**Морфометрические параметры и масса семян в трех группах  
*Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya, участвующих в исследовании**

**Morphometric parameters and weight in three groups  
of *Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya seeds used in this study**

Параметры (среднее ± ошибка среднего)	Группы		
	1	2	3
Длина семени, мм	$4,50 \pm 0,022$	$4,42 \pm 0,022$	$4,27 \pm 0,024$
Ширина семени, мм	$2,56 \pm 0,013$	$2,52 \pm 0,012$	$2,45 \pm 0,013$
Толщина семени, мм	$1,42 \pm 0,008$	$1,45 \pm 0,010$	$1,36 \pm 0,009$
Площадь поверхности семени, $\text{мм}^2$	$36,40 \pm 0,31$	$35,15 \pm 0,30$	$32,99 \pm 0,32$
Объем семени, приведенный к эллипсоиду, $\text{мм}^3$	$8,66 \pm 0,10$	$8,57 \pm 0,11$	$7,57 \pm 0,11$
Масса семени, г	$0,0062 \pm 0,000085$	$0,0059 \pm 0,000091$	$0,0059 \pm 0,000085$

Примечание: данные адаптированы из работ [Новиков и др., 2023б; Ребко и др., 2024а] и приведены справочно.

*Оптометрия семенного материала.* Получали с помощью планшетного сканера, например, как у [Bernardes et al., 2023], спектральное изображение семян в видимом (VIS) диапазоне длин волн, RGB-пространстве в количестве, равном высеиваемому в один контейнер (40 штук) и рандомизированном в соответствующем высеву порядке. Сегментировали изображение с помощью специально разработанной компьютерной программы для получения индивидуального изображения каждого семени. Более подробно методика получения спектральных показателей семян в RGB-пространстве рассмотрена у Т.П. Новиковой [2024]. Рассчитывали следующие оптометрические показатели [Монич, Старовойтов, 2011; Голуб, 2022]:

1. R – яркость красного канала (8 бит) сегментированного изображения единичного семени, ед. яркости;
2. G – яркость зеленого канала (8 бит) сегментированного изображения единичного семени, ед. яркости;
3. В – яркость синего канала (8 бит) сегментированного изображения единичного семени, ед. яркости;
4. Средняя яркость  $\bar{Y}_{cp}$  сегментированного изображения единичного семени

$$\bar{Y}_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{q_{pix}} Y_{pix}}{q_{pix}}, \quad (1)$$

где  $Y_{pix}$  – яркость одного пикселя в сегментированном изображении единичного семени, ед. яркости;  $q_{pix}$  – число пикселей в сегментированном изображении единичного семени;

5. Резкость по яркости  $R_{ZK,y}$ , характеризующая локальную степень размытия деталей сегментированного изображения единичного семени:

$$R_{ZK,y} = \frac{1}{q_{pix}} \sum_{j=0}^{h-1} \sum_{i=0}^{w-1} \frac{\left[ (Y_{pix(i,j)} - Y_{pix(i-1,j)}) \right] + \left[ (Y_{pix(i,j)} - Y_{pix(i,j-1)}) \right]}{2}, \quad (2)$$

где  $Y_{pix(i,j)}$  – яркость пикселя с координатами  $(i,j)$  в сегментированном изображении единичного семени, ед. яркости;

6. Контраст по яркости Кнтр<sub>y</sub>, относительная величина, характеризующая долю различия между максимальными и минимальными значениями яркости пикселей сегментированного изображения единичного семени:

$$Kntr_y = \frac{Y_{pix(MAX)} - Y_{pix(MIN)}}{Y_{pix(MAX)} + Y_{pix(MIN)}}, \quad (3)$$

где  $\text{Я}_{pix(\text{МАХ})}$  – максимальная яркость пикселей в сегментированном изображении единичного семени, ед. яркости;  $\text{Я}_{pix(\text{МН})}$  – минимальная яркость пикселей в сегментированном изображении единичного семени, ед. яркости.

*Получение контейнерных саженцев.* Семена всех трех групп были высеяны 23 июня 2023 года в порядке, соответствующем порядку раскладки семян при получении их изображения, с использованием 40-ячеистых сайд-слит контейнеров Hico (BCC AB). На семенное ложе, образованное торфом кислой реакции, количество и плотность которого устанавливались автоматически с помощью устройства для заполнения контейнеров, вручную, в центр ячейки, на глубину 1 см помещали одно семя, после чего мульчировали перлитом бровень с бортиками ячейки. 30 контейнеров были размещены в теплице с контролируемой температурой, влажностью и автоматическим поливом с помощью рампы. Грунтовую всхожесть индивидуальных семян контролировали, как рекомендовано в работах [Пименов, 2015; Mañas et al., 2009], на 30 и 50 дни с момента высеява [Новиков и др., 2023b]. Далее, 31.10.2023, первая группа была пересажена из контейнеров на постоянное место экспериментального участка, вторая – переставлена в контейнерах на площадку для закаливания и пересажена весной, 29.03.2024; третья –переставлена в контейнерах на площадку для закаливания и пересажена осенью, 01.11.2024.

*Характеристика постоянного экспериментального участка.* Экспериментальный объект культур сосны обыкновенной сорта «Негорельская» создавали пересадкой выращенных в контейнерах лесного питомника индивидуальных деревьев из семян с известными оптометрическими (RGB), морфометрическими показателями,ключенными в технологический паспорт «семя – культура» [Новикова, 2024]. Пересадку культур с закрытой корневой системой из сайд-слит контейнеров (40 ячеек по 120 см<sup>3</sup>) производили в борозду под меч Колесова на территории Левобережного лесничества Учебно-опытного лесхоза Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова (394050, г. Воронеж, Железнодорожный район, кордон Боровской, координаты начала посадочного ряда – 51°46'34,2" с.ш. 39°18'57,6"в.д.). Создание объекта закрешили актом от 31 октября 2023 года о внедрении научно-исследовательской работы между ВГЛТУ и Учебно-опытным лесхозом ВГЛТУ.

Временные вехи пересадки и биометрической оценки в первый вегетационный период каждой из трех групп саженцев, участвующих в эксперименте, представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Даты и возраст на момент пересадки и биометрического контроля  
трех групп саженцев *Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya,  
участвующих в исследовании**

**Dates and ages at the time of outplanting and biometric control  
of three groups of *Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya seedlings for this study**

Показатели	Группы саженцев		
	1	2	3
Количество высеванных в контейнеры семян (диапазон), шт.	400 (1–400)	400 (401–800)	400 (801–1200)
Диапазон контейнеров	1–10	11–20	21–30
Дата высева семян в контейнеры	23.06.2023	23.06.2023	23.06.2023
Количество взошедших в ячейках контейнеров семян на 50-й день, шт.	315	322	301
Дата пересадки культур на постоянное место (время года)	31.10.2023 (осень)	29.03.2024 (весна)	01.11.2024 (осень)
Возраст при пересадке с момента высеваания, дней	131	281	497
Количество культур с ненулевым виталиитетом на момент пересадки, шт.	302	308	222**
Дата биометрических измерений	29.10.2024	29.10.2024	01.11.2024*
Возраст саженцев с момента пересадки, дней	364	214	0*
Количество культур с ненулевым виталиитетом на момент измерения, шт.	181	195	222**

*Примечание:* \* перед пересадкой осуществляли биометрическую оценку культур, находившихся с 31.10.2023 на площадке для закаливания автоматизированного лесного питомника; \*\* один контейнер с культурами (из семян с 1161 по 1200) изъяли для оценки индекса качества саженцев Диксона [Новиков и др., 2023а].

Характер накопления градусо-дней [Новикова и др., 2022] и осадков на экспериментальном участке в оцениваемый период (с 29.10.2024 по 01.11.2024) приведен на рис. 1.

*Анализ данных.* Для оценки применимости тех или иных критериев дисперсионного анализа оценивали нормальность распределения В/Д отношения, осуществляя построение графика квантиль-квантиль (рис. 2) на основе платформы для статистики.

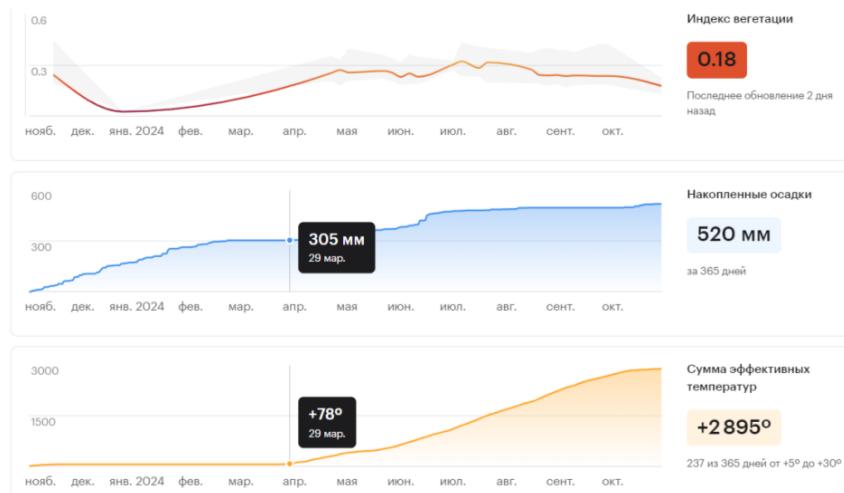


Рис. 1. Индекс вегетации, накопленные осадки и сумма эффективных температур в оцениваемом периоде онтогенеза культур сосны обыкновенной сорта «Негорельская» с 29.10.2023 по 01.11.2024 (белым шрифтом на черном фоне показаны показатели на момент пересадки второй группы саженцев 29.03.2024)

Fig. 1. Vegetation index, accumulated precipitation and the sum of effective temperatures in the estimated period of ontogenesis of Scots pine Negorelskaya variety from 10/29/2023 to 11/01/2024 (white font on a black background shows the indicators at the time of transplantation of the second group of seedlings on 03/29/2024)

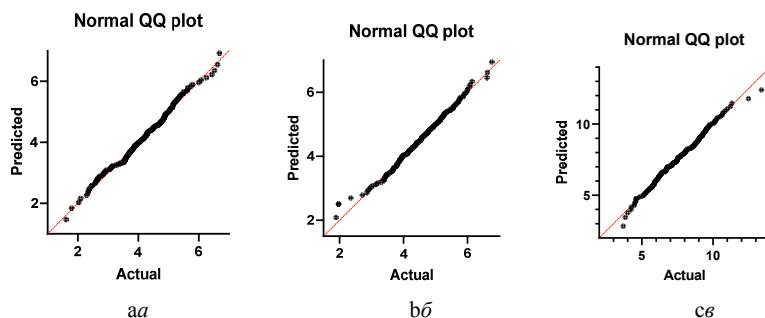


Рис. 2. Проверка на Гауссово распределение отношения высоты к диаметру корневой шейки саженцев первой (а), второй (б) и третьей (с) групп, участвующих в исследовании

Fig. 2. Checking for the Gaussian distribution of the ratio of height to diameter of the root neck of seedlings of the first (a), second (b) and third (c) groups using in the study

Во всех трех группах саженцев распределение вариант В/Д отношения максимально возможно приближено к распределению Гаусса, за исключением краев, поэтому для проведения дисперсионного анализа использовали параметрический критерий. Проверку нуль-гипотезы производили по аналогии с [Novikov, Ivetic, 2018] в предположении, что средние варианты независимой переменной В/Д отношения статистически не дифференцированы в группах саженцев с разным временем пересадки. Для уточнения степени различия (или отсутствия различия) использовали множественное сравнение на основании пост-хок теста Тьюки, например как у [Kerkez et al., 2018]. Закономерности изменения биометрического отношения высоты саженца к диаметру корневой шейки (В/Д отношения) в зависимости от шести оптометрических показателей семенной кожуры, приведенных в разделе «Материалы и методы», оценивающие разброс значений, визуализировали с помощью скаттерплота и аппроксимирующей линии регрессии второй степени.

*Результаты исследования и их обсуждение.* Табл. 4 представляет численные значения описательных статистик биометрического В/Д отношения в трех группах саженцев (табл. 3) *P. sylvestris* var. Negorelskaya из соответствующих индивидуальных семян (табл. 2) с известными оптометрическими показателями. В табл. 5 рассчитаны дисперсионные (ANOVA) показатели для проверки нуль-гипотезы путем множественного сравнения средних статистик для трех групп саженцев, участвующих в исследовании, а на рис. 3 – размах (разница между максимальным и минимальным значениями В/Д отношения) и точечное распределение значений В/Д отношения в соответствующих группах саженцев с отображением меры центральной тенденции (среднего) и уровня значимости *p* при апостериорной проверке нуль-гипотезы по методике Тьюки.

На рис. 4 (первая группа), 5 (вторая группа) и 6 (третья группа) представлены регрессионные зависимости изменения биометрического В/Д отношения раннего роста саженцев на конец первого вегетационного периода от шести оптометрических показателей внешней естественной оболочки соответствующих семян.

Результаты расчетов статистических показателей в табл. 4 и 5 свидетельствуют о том, что нуль-гипотезу об отсутствии различий между средними вариантами В/Д отношения необходимо отвергнуть.

Поскольку различия между средними В/Д отношения для всех трех групп саженцев не случайны, а время высеяния в контейнеры одинаково, можно предположить, что наблюдаемая небольшая этиология саженцев третьей группы (среднее – 7,62; медиана – 7,52; размах – 5,88) может быть объяснена технологическими условиями нахождения сеянцев в контейнерах на откры-

той площадке для закаливания, увеличивающими рост в высоту и ингибирующими рост в диаметре [Santos et al., 2023]. Также достаточно высокие значения В/Д отношения могут являться индикатором вероятности затухания роста саженцев после пересадки [Sousa et al., 2022]. В/Д отношение, демонстрируемое на 494 день от момента высева в контейнер при осенней пересадке 131-дневных (1 группа) и весенней пересадке 281-дневных (2 группа) культур в поле, различается незначительно, но все же статистически значимо, и может быть соотнесено по значениям (mean  $4,22 \pm SD 0,97$  и  $4,54 \pm 0,87$  см  $mm^{-1}$  соответственно) с исследованиями [Santos et al., 2023] (*Alibertia edulis* (Rich.)  $4,38 \pm 0,73$  см  $mm^{-1}$  | 0% тени,  $5,32 \pm 0,80$  см  $mm^{-1}$  | 50% тени; 275 дней с момента высева; теплица).

Таблица 4

**Биометрическое отношение высоты к диаметру корневой шейки трех групп саженцев *Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya по времени пересадки**

**Heights / Diameter ratio of the three seedlings groups (*Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya) according to the outplanting time**

Статистический параметр	Группы саженцев		
	1	2	3
Количество саженцев (N)	185	195	223
Минимум	1,610	1,890	3,680
25-й процентиль	3,620	3,940	6,330
Медиана	4,220	4,540	7,520
75-й процентиль	4,870	5,130	8,880
Максимум	6,680	6,760	13,400
Межквартильный размах	5,070	4,870	9,720
Среднее	4,187	4,519	7,620
Стандартное отклонение	0,974	0,868	1,685
Стандартная ошибка среднего	0,072	0,062	0,113
Нижний предел 95% доверительного интервала	4,045	4,396	7,398
Верхний предел 95% доверительного интервала	4,328	4,641	7,843
Коэффициент вариации (KB), %	23,41	19,20	22,12
Асимметрия	-0,111	-0,221	0,170
Эксцесс	-0,030	0,405	0,021

*Примечание:* Для расчета и оценки биометрических параметров использовали наборы данных для индивидуальных семян *Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya и полученных из них растений [Петрищев и др., 2023а, б, с].

Таблица 5

**Дисперсионный анализ и множественное сравнение Тьюки для проверки нуль-гипотезы об отсутствии различий между средними В/Д отношения для трех групп саженцев *Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya по времени пересадки**

**Analysis of variance and multiple comparison of Tukey to test the null hypothesis that there are no differences between the average Heights / Diameter ratio for three seedlings groups of *Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya by outplanting time**

Статистический параметр	Группы сравнения		
	1 vs. 2	1 vs. 3	2 vs. 3
Количество выборки для первого значения (n1)	185	185	195
Количество выборки для второго значения (n2)	195	223	223
Среднее первого значения (Mean 1)	4,187	4,187	4,519
Среднее второго значения (Mean 2)	4,519	7,620	7,620
Разница средних (Mean Diff.)	-0,3321	-3,434	-3,101
Ошибка разницы (SE of diff.)	0,1292	0,1252	0,1236
95% доверительный интервал разницы (95% CI of diff.)	От -0,6358 до -0,02849	От -3,728 до -3,139	От -3,391 до -2,811
q	3,635	38,78	35,53
DF	600	600	600
Уровень значимости (P-value)	0,0280	<0,0001	<0,0001

Рост из дифференцированных по оптическому и геометрическому признакам семян однолетних контейнерных сеянцев *P. sylvestris* в теплице и на площадке для закаливания автоматизированного лесного питомника [Novikov, Ivetic, 2018, 2019] обнаружил статистически значимые различия между биометрическими параметрами сеянцев (высотой, диаметром стволика у корневой шейки), произведенных из разных групп семян. Наряду с этим, по данным [Novikov et al., 2019], светлые семена сосны обыкновенной демонстрируют «лучшие результаты роста в высоту ЗКС-саженцев на постоянном месте в конце первого вегетационного периода по сравнению с другими цветными фракциями, при этом приживаемость саженцев средняя». Также для видов сосны существуют исследования взаимосвязи меж-

ду высотой и диаметром, обозначаемой в одних источниках как H/D ratio [Kerkez et al., 2018], в других – как SQ (Sturdiness Coefficient) [Devetaković et al., 2020], которые показывают, что данное биометрическое отношение является наиболее надежным признаком дерева для прогнозирования онтогенеза в полевых условиях.

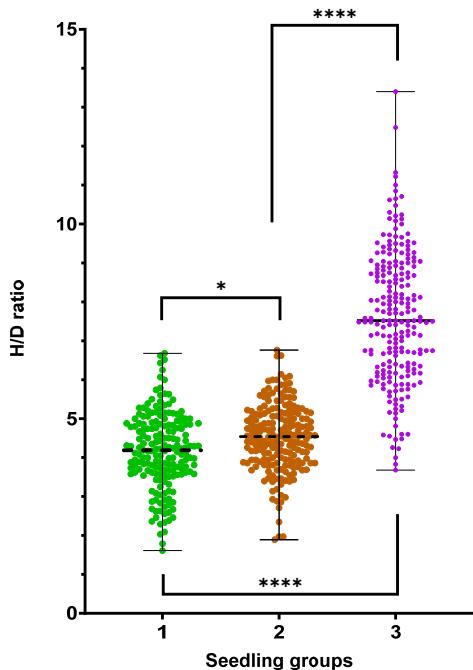
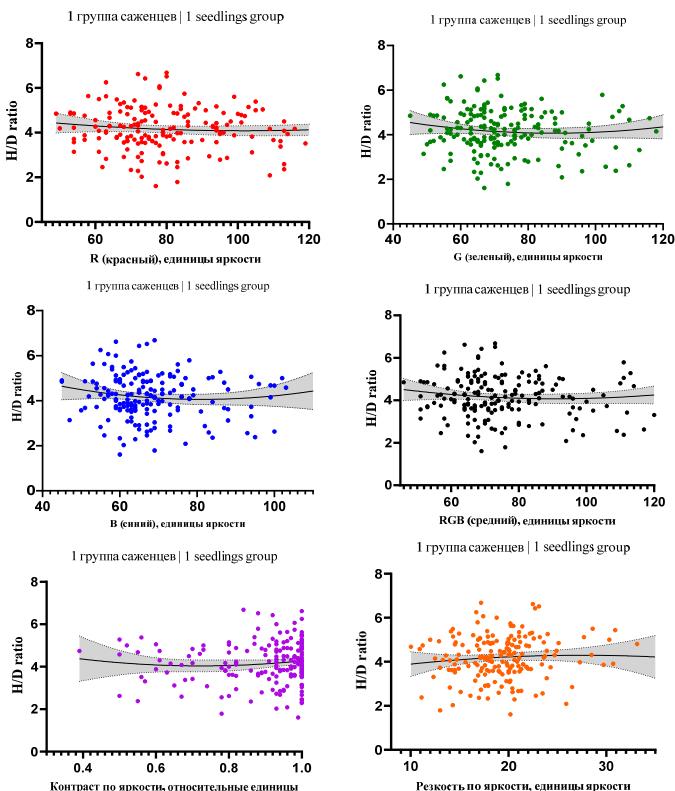


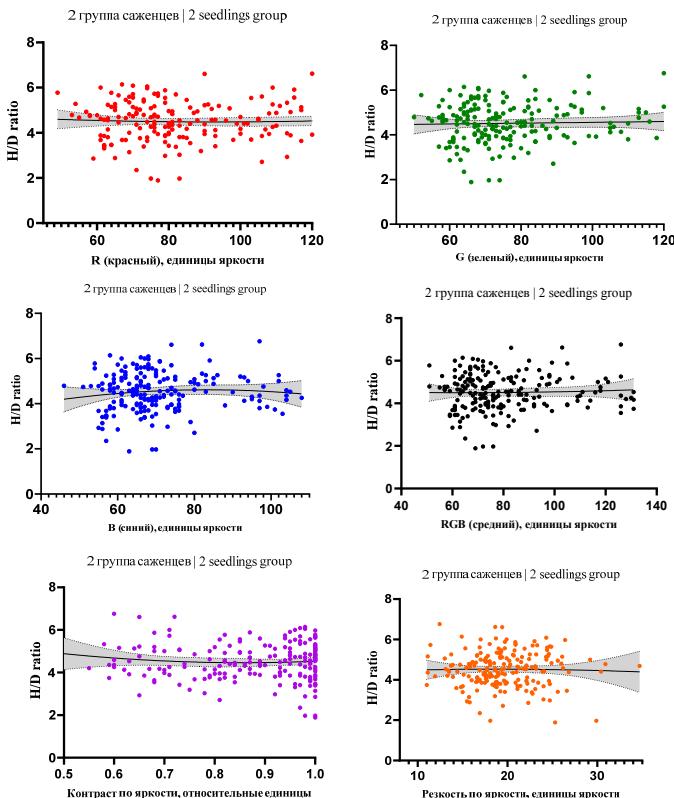
Рис. 3. Рассеяние и размах вариант биометрического В/Д отношения саженцев *Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya первой, второй и третьей групп, используемых в исследовании. Нуль-гипотеза отвергается на основании пост-хок теста Тьюки на уровне значимости \* ( $p = 0,0280$ ) ( $p < 0,0001$ )

Fig. 3. Scattering and span variant of the biometric H/D ratio of *Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya of the first, second and third seedlings groups used in the study. The null-hypothesis is rejected based on the post-hoc Tukey's test at the significance level \* ( $p = 0.0280$ ) ( $p < 0.0001$ )



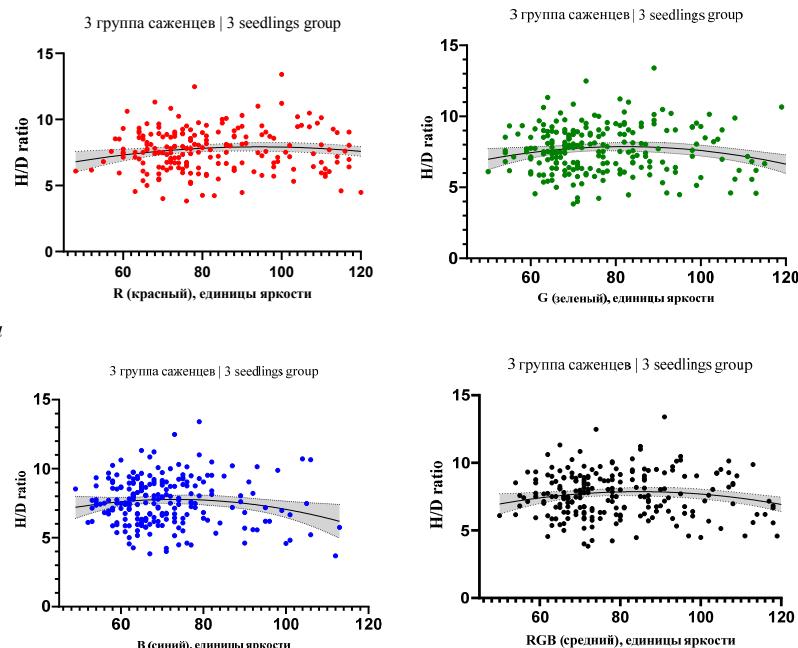
*Рис. 4. Распределение влияния параметров яркости внешней оболочки индивидуальных семян 1 группы (номера 1–400) сосны обыкновенной сорта «Негорельская» на биометрическое отношение высоты (см) к диаметру корневой шейки (мм) полученных из них контейнерных саженцев (возраст на момент пересадки 31.10.2023 – 131 день, 0,36 + 0; контейнерная всхожесть на 50-й день – 318 из 400, 78,8%; сохранность на момент пересадки в поле – 302 из 400, 75,5%; возраст на момент измерений – 494 дня; сохранность на момент измерений 29.10.2024 – 181 из 400, 45,3%)*

*Fig. 4. Distribution of the influence of the brightness parameters of the outer shell of individual seeds of group 1 (numbers 1–400) of the Scots pine variety «Negorelskaya» on the biometric ratio of height (cm) to the diameter of the root neck (mm) of container seedlings obtained from them (age at the time of outplanting 31.10.2023 – 131 days, 0,36 + 0; container germination by 50th day – 318 out of 400, 78.8%; safety at the time of outplanting in the field – 302 out of 400, 75.5%; age at the time of measurements – 494 days; survival at the time of measurements on 10/29/2024 – 181 out of 400, 45,3%)*



*Рис. 5. Распределение влияния параметров яркости внешней оболочки индивидуальных семян 2 группы (номера 401–800) сосны обыкновенной сорта «Негорельская» на биометрическое отношение высоты (см) к диаметру корневой шейки (мм) полученных из них контейнерных саженцев (возраст на момент пересадки 29.03.2024 – 281 день, 0,77 + 0; контейнерная всхожесть на 50-й день – 322 из 400, 80,5%; сохранность на момент пересадки в поле 308 из 400, 77%; возраст на момент измерений – 494 дня; сохранность на момент измерений 29.10.2024 – 195 из 400, 48,8%)*

*Fig. 5. Distribution of the influence of the brightness parameters of the outer shell of individual seeds of group 2 (total numbers 401–800) of the Scots pine variety «Negorelskaya» on the biometric ratio of height (cm) to the diameter of the root neck (mm) of container seedlings obtained from them (age at the time of transplantation 03/29/2024 – 281 days, 0.77 + 0; container germination by 50th day – 322 out of 400, 80.5%; safety at the time of transplantation in the field – 308 out of 400, 77%; age at the time of measurements – 494 days; survival at the time of measurements on 10/29/2024 – 195 out of 400, 48.8%)*

*a*

*Рис. 6. Распределение влияния параметров яркости внешней оболочки индивидуальных семян 3 группы (номера 801–1160) сосны обыкновенной сорта «Негорельская» на биометрическое отношение высоты (см) к диаметру корневой шейки (мм) полученных из них контейнерных сеянцев (возраст 497 дней с момента высея; 1,36 + 0; контейнерная всхожесть на 50-й день – 267 из 360, 74,2%; сохранность на момент пересадки 01.11.2024 в поле – 222 из 360, 62%)*

*Fig. 6. Distribution of the influence of the brightness parameters of the outer shell of individual seeds of group 3 (numbers 801–1160) of the Scots pine variety «Negorelskaya» on the ratio of height (cm) to the diameter of the root neck (mm) of container seedlings obtained from them (age 497 days from the moment of sowing; 1,36 + 0; container germination on the 50th day – 267 out of 360, 74.2%; safety at the time of transfer in the field – 222 out of 360, 62%)*

В будущем путем интеграции всех измеренных и рассчитанных параметров раннего роста культур сосны обыкновенной сорта «Негорельская» в справочную информационную систему «FRM-Library» [Новикова и др., 2023], будет уточнена методика [Novikova, 2022] выбора технологических операций и оборудования в технологии восстановления лесных ландшафтов, что было бы полезным для интенсификации процесса лесовыращива-

ния. Более того, тесная корреляция между показателями высоты и диаметра, как показано в исследованиях [Jiang et al., 2022; Novikova et al., 2023], может способствовать выбору лучших деревьев, в будущем, исключению операции измерения высоты саженца для прогнозирования роста и развития деревьев [Лебедев, 2022], и, возможно, использоваться для исследования закономерностей формирования надземной биомассы [Нагимов, 2000].

Более того, проследив прирост культур сосны обыкновенной сорта «Негорельская» по высоте и диаметру на втором и последующих вегетационных периодах ювенильного этапа на восстанавливаемом участке лесного ландшафта, возможно будет точнее установить степень интенсификации лесовосстановительного производства *P. sylvestris* L. var. Negorelskaya в зависимости от начальных свойств семени.

#### *Заключение.*

1. Биометрические параметры высоты саженца и диаметра стволика у корневой шейки возле корня позволяют прогнозировать качество саженца: В/Д отношение включено в знаменатель при расчете индекса качества Диксона, поэтому увеличение отношения приведет к уменьшению индекса качества;

2. Мера центральной тенденции биометрического показателя – В/Д отношения – ( $M | 4,187$ ;  $SD | 0,974$ ) в первой группе саженцев сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L. var. Negorelskaya) при  $F (2,600) = 475,2$ , степени свободы  $DF = 602$  и уровне достоверности  $p < 0,0001$  статистически значимо отличается от средних вариантов В/Д отношения во второй ( $M | 4,519$ ;  $SD | 0,868$ ) и третьей ( $M | 7,620$ ;  $SD | 1,685$ ) группах саженцев, участвующих в исследовании.

3. Регрессионный анализ влияния оптометрических показателей внешней естественной оболочки семян на В/Д отношение, например, для первой группы саженцев, наблюдаемое на первом вегетационном периоде, показывает наличие характерных скоплений половины значений оптометрических показателей в следующих диапазонах: от 60 до 80 единиц яркости для R-, G-, B- и RGB параметров, от 0,9 до 1,0 относительных единиц для параметра контраста и от 15 до 23 единиц яркости для параметра резкости.

*Вклад авторов:* Новикова Т.П. – концепция статьи, методология, программное обеспечение, валидация данных, формальный анализ, ресурсы, подготовка первоначального варианта рукописи, редактирование и корректировка по замечаниям рецензентов, визуализация, управление проектом, привлечение грантового финансирования; Ребко С.В. – методология, формальный анализ, ресурсы, подготовка первоначального варианта рукописи, редактирование и корректировка по замечаниям рецензентов.

ниям рецензентов; Петрищев Е.П. – обработка и создание наборов данных, подготовка первоначального варианта рукописи, редактирование и корректировка по замечаниям рецензентов; Новиков А.И. – концепция статьи, методология, валидация данных, формальный анализ, ресурсы, подготовка первоначального варианта рукописи, редактирование и корректировка по замечаниям рецензентов, визуализация. Все авторы прочитали представляемую версию рукописи и согласились с ней.

*Сведения о финансировании:* исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-26-0028.

*Конфликт интересов.* Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### **Библиографический список**

*Бачериков И.В.* Совершенствование функционирования закрытых складов древесных сыпучих материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб.: СПбГЛТУ, 2017. 21 с.

*Голуб Ю.И.* Оценка качества цифровых изображений // Системный анализ и прикладная информатика. 2021. № 4. С. 4–15. DOI: 10.21122/2309-4923-2021-4-4-15.

*Дурова А.С., Жигунов А.В.* Влияние биоугля на всхожесть семян и рост сеянцев хвойных пород в условиях закрытого грунта // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2017. Вып. 219. С. 18–31. DOI: 10.21266/2079-4304.2017.219.18-31.

*Лебедев А.В.* Прогнозирование роста по средней высоте культур сосны с использованием обобщенного алгебраического разностного подхода // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. Вып. 238. С. 49–66. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.238.49-66.

*Монич Ю.И., Старовойтов В.В.* Мера оценки резкости цифрового изображения // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2011. № 1. С. 80–84.

*Нагимов З.Я.* Закономерности роста и формирования надземной фитомассы сосновых древостоев: дис. ... д-ра с.-х. наук. Екатеринбург: УГЛТА, 2000. 409 с.

*Новиков А.И.* Дисковые сепараторы семян в лесохозяйственном производстве. Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2017. 159 с.

*Новиков А.И.* Экспресс-анализ лесных семян биофизическими методами. Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2018. 128 с.

*Новиков А.И.* Влияние сортирования семян сосны обыкновенной по цвету и размерам на их грунтовую всхожесть в контейнерах // Хвойные бореальной зоны. 2019а. Т. 37. № 5. С. 313–319.

*Новиков А. И.* Некоторые результаты апробации технологии сепарации по количественному признаку семян сосны обыкновенной // Известия Санкт-

Петербургской лесотехнической академии. 2019b. Вып. 227. С. 68–87. DOI: 10.21266/2079-4304.2019.227.68-87.

*Новиков А.И.* Совершенствование технологии получения высококачественного лесосеменного материала: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Воронеж, 2021. 32 с.

*Новиков А.И., Драпалюк М.В., Соколов С.В., Новикова Т.П.* Экспресс-анализ семян в лесохозяйственном производстве: теоретические и технологические аспекты. Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2022. 176 с.

*Новиков А.И., Ребко С.В., Новикова Т.П., Петрищев Е.П.* Индекс качества Диксона: связь с технологическим воздействием на лесные семена // Лесотехнический журнал. 2023а. Т. 13, № 1. С. 23–36. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.1/2.

*Новиков А.И., Ребко С.В., Новикова Т.П., Петрищев Е.П.* Влияние индивидуальной массы семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) сорта «Негорельская» на 30-дневное прорастание в 40-ячеистых SideSlit-контейнерах // Лесотехнический журнал. 2023б. Т. 13, № 2 (50). С. 59–86. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.2/4.

*Новиков А.И., Ребко С.В., Новикова Т.П., Петрищев Е.П.* Исследование спектрометрических показателей семян как основа интенсификации процесса лесовыращивания культур сосны обыкновенной сорта «Негорельская»: грант РНФ 23-26-00228. М. : Российский научный фонд, 2023с. URL: <https://elibrary.ru/jtyuixh> (дата обращения: 01.10.2024)

*Новикова Т.П.* Технологический паспорт «семя – культура»: идентификация параметров RGB-яркости и цветности индивидуальных семян *Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya на основе авторской методики // Лесотехнический журнал. 2024. Т. 14, № 3(55). С. 37–60. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2024.3/3.

*Новикова Т.П., Малышева В.И., Петрищев Е.П.* Влияние климатического индекса градусо-дней на виталитет 3-летних сеянцев сосны обыкновенной из сорттированных по спектрометрическим свойствам семян // Лесотехнический журнал. 2022. Т. 12, № 1(45). С. 110–118. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2022.1/9.

*Новикова Т.П., Новиков А.И., Лисицын В.И., Петрищев Е.П.* Справочная информационная система FLR-Library для адаптивного лесовосстановления: кластерный анализ дескрипторов // Лесотехнический журнал. 2023. Т. 13, № 3(51). С. 164–179. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.3/12.

*Петрищев Е.П.* Исследование взаимосвязи биометрических параметров ювенильных сеянцев сосны обыкновенной из кондиционных семян при оценке результатов лесовосстановления // Лесотехнический журнал. 2021. Т. 11, № 4(44). С. 161–169. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/14.

*Петрищев Е.П., Новикова Т.П., Новиков А.И.* Результаты исследований посевных качеств семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L., сорт Негорельская) и определения индекса качества Диксона 60-дневных сеянцев в контейнер-

ном питомнике. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023624604 РФ: № 2023624416; заявл. 01.12.2023; опубл. 13.12.2023а.

Петрищев Е.П., Новикова Т.П., Ребко С.В., Новиков А.И. Результаты морфометрических исследований семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L., сорт Негорельская). Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023624679 РФ: № 2023624380; заявл. 01.12.2023; опубл. 18.12.2023б.

Петрищев Е.П., Новикова Т.П., Новиков А.И. Результаты исследований спектрометрических показателей семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L., сорт Негорельская). Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023624752 РФ: № 2023624389; заявл. 01.12.2023; опубл. 19.12.2023с.

Пименов А.В. Биоразнообразие сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в контрастных экотопах Юга Сибири: дисс. ... д-ра биол. наук. Красноярск: Институт леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук, 2015. 406 с.

Поплавская Л.Ф., Ребко С.В., Тупик П.В. Результаты районирования сосны обыкновенной сорта Негорельская в Республике Беларусь // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2021. Т. 1, № 240. С. 58–67. DOI: 10.52065/2519-402x-2021-240-7-58-67.

Прияткин Н.С. Неинвазивная экспресс-оценка разнокачественности и хозяйственной пригодности семенного материала на основе использования инструментальных физических методов: дис. ... д-ра биол. наук. СПб.: АФИ, 2023. 253 с.

Ребко, С.В., Новиков А.И., Новикова Т.П., Петрищев Е.П. Взаимосвязи между геометрическими и гравиметрическими параметрами семян сосны обыкновенной // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2024а. Т. 276. С. 66–76. DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-8.

Ребко С.В., Новиков А.И., Новикова Т.П., Петрищев Е.П. Характеристика происхождения исходного материала сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) сорта «Негорельская» // Ботаника (исследования). 2024б. Т. 54. С. 213–225.

Bacherikov I.V., Raupova D.E., Durova A.S., Bragin V.D., Petrishchev E.P., Novikov A.I., Danilov D.A., Zhigunov A.V. Coat Colour Grading of the Scots Pine Seeds Collected from Faraway Provenances Reveals a Different Germination Effect // Seeds. 2022. Vol. 1, No. 1. P. 49–73. DOI: 10.3390/seeds1010006.

Bernardes R.C., De Medeiros A., Silva L. da, Cantoni L., Martins G.F., Mastrangelo T., Novikov A., Mastrangelo C.B. Deep-Learning Approach for *Fusarium* Head Blight Detection in Wheat Seeds Using Low-Cost Imaging Technology // Agriculture. 2022. Vol. 12, no. 11. Art. no. 1801. DOI: 10.3390/agriculture12111801.

Daneshvar A., Tigabu M., Karimidoost A., Oden P.C. Single seed Near Infrared Spectroscopy discriminates viable and non-viable seeds of *Juniperus polycarpos* // Silva Fennica. 2015. Vol. 49, no. 5. Art. no. 1334. DOI: 10.14214/sf.1334.

Devetaković J., Krinulović L., Jancović I.K. Effect of sowing pattern and density on the quality of one-year-old Austrian pine bareroot seedlings // Reforesta. 2020. № 10. P. 25–30. DOI: 10.21750/refor.10.03.86.

Egbäck S., Bullock B.P., Isik F., McKeand S.E. Height-Diameter Relationships for Different Genetic Planting Stock of Loblolly Pine at Age 6. // Forest Science. 2015. Vol. 61, no. 3. P. 424–428. DOI: 10.5849/forsci.14-015.

Farhadi M., Tigabu M., Oden P.C. Near Infrared Spectroscopy as non-destructive method for sorting viable, petrified and empty seeds of *Larix sibirica* // Silva Fennica. 2015. Vol. 49, no. 5. Art. no. 1340. DOI: 10.14214/sf.1340.

Farhadi M., Tigabu M., Stener L.-G., Oden P.C. Feasibility of visible + near infrared spectroscopy for non-destructive verification of European × Japanese larch hybrid seeds // New Forests. 2016. Vol. 47, no. 2. P. 271–285. DOI: 10.1007/s11056-015-9514-4.

Farhadi M., Tigabu M., Pietrzykowski M., Danusevičius D., Oden P.C. Application of near infrared spectroscopy for authentication of *Picea abies* seed provenance // New Forests. 2017. Vol. 48, no. 5. P. 629–642. DOI: 10.1007/s11056-017-9589-1.

Gomes, É.S., Foseca de Oliveira G.R., Rodrigues A.A., Corrêa C.G., Almeida E. de, Carvalho H.W.P. de, Arthur V., Silva E.A.A. da, Novikov A.I., Mastrangelo C.B. Ultrasound technology supplements zinc in soybean seeds and increases the photosynthetic efficiency of seedlings // Computers and Electronics in Agriculture. 2024. Vol. 227. Art. no. 109619. DOI: 10.1016/j.compag.2024.109619.

Ivetić V., Grossnickle S., Škorić M. Forecasting the field performance of Austrian pine seedlings using morphological attributes // IForest. 2017. Vol. 10, № 1. P. 99–107. DOI: 10.3832/ifor1722-009.

Jiang L., Xu X., Cai Q., Han R., Tigabu M., Jiang T., Zhao X. Variations in Growth and Photosynthetic Traits of Polyploid Poplar Hybrids and Clones in Northeast China // Genes. 2022. Vol. 13, no. 11. Art. no. 2161. DOI: 10.3390/genes13112161.

Kerkez I., Nonić M., Devetaković J., Šijacić-Nikolić M., Ivetić V. The effect of half-sib lines on morphological attributes of one-year old *Fraxinus angustifolia* seedlings // Reforesta. 2018. No. 5. P. 15–21. DOI: 10.21750/REFOR.5.03.49.

Mañas P., Castro E., Heras J. de las. Quality of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) seedlings using waste materials as nursery growing media // New Forest. 2009. Vol. 37, Iss. 3. P. 295–311.

Nigul K., Padari A., Kivistö A.Noe S.M., Korjus H., Laarmann D., Frelich L.E., Jõgiste K., Stanturf J.A., Paluots T., Põldveer E., Kängsepp V., Jürgenson H., Metslaid M., Kangur A. The Possibility of Using the Chapman–Richards and Näslund Functions to Model Height–Diameter Relationships in Hemiboreal Old-Growth Forest in Estonia // Forests. 2021. Vol. 12, no. 2. Art. no. 184. DOI: 10.3390/fl2020184.

Novikov A.I., Ivetić V. The effect of seed size grading on seed use efficiency and height of one-year-old container-grown Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings // Reforesta. 2018. Vol. 6. P. 100–109. DOI: 10.21750/REFOR.6.08.61.

*Novikov A.I., Ivetić V.* The effect of seed coat color grading on height of one-year-old container-grown Scots pine seedlings planted on post-fire site // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Art. no. 012043. DOI 10.1088/1755-1315/226/1/012043.

*Novikov A., Sokolov S., Drapalyuk M., Zelikov V., Ivetić V.* Performance of Scots pine seedlings from seeds graded by colour // Forests. 2019. Vol. 10, no. 12. Art. no. 1064. DOI: 10.3390/F10121064.

*Novikov A.I., Lisitsyn V.I., Tigabu M., Tylek P., Chuchupal S.* Detection of Scots pine single seed in optoelectronic system of mobile grader: Mathematical modeling // Forests. 2021. Vol. 12, no. 2. P. 1–18. DOI: 10.3390/f12020240.

*Novikova T.P.* The choice of a set of operations for forest landscape restoration technology // Inventions. 2022. Vol. 7, no. 1. Art. no. 1. DOI: 10.3390/inventions7010001.

*Novikova, T.P.* Assessment of the forest seed material quality at the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) experimental site during adaptive restoration of forest landscapes // Forestry Engineering Journal. 2023. Vol. 13, no. 1. P. 112–128. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.1/8.

*Novikova T.P., Tylek P., Mastrangelo C.B., Drapalyuk M.V., Kharin S.V., Novikov A.I.* The Root Collar Diameter Growth Reveals a Strong Relationship with the Height Growth of Juvenile Scots Pine Trees from Seeds Differentiated by Spectrometric Feature // Forests. 2023. Vol. 14, no. 6. Art. no. 1164. DOI: 10.3390/f14061164.

*Rodriguez de Prado D., Riofrío J., Aldea J., McDermott J., Bravo F., Aza C.H. de.* Species Mixing Proportion and Aridity Influence in the Height–Diameter Relationship for Different Species Mixtures in Mediterranean Forests // Forests. 2022. Vol. 13. Art. no. 119. DOI: 10.3390/f13010119.

*Santos C.C., Goelzer A., da Silva O.B., dos Santos F.H.M., Silverio J.M., Scalon S.P.Q., Vieira M.C., Zárate N.A.H.* Morphophysiology and quality of *Alibertia edulis* seedlings grown under light contrast and organic residue // Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. 2023. Vol. 27, no. 5. P. 375–382. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v27n5p375-382.

*Sousa D.J.P., Nogueira G.A.S., Teixeira K.B.S., Monteiro G.G.T.N., Brito A.E.A., Nascimento V.R., Albuquerque G.P.D., Oliveira T.J.M., Souza L.C., Freitas J.M.N., Oliveira Neto C.F., Okumura R.S.* Mitigation of the effects of salt stress in cowpea bean through the exogenous application of brassinosteroid // Brazilian Journal of Biology. 2022. Vol. 82. P. 1–7. DOI: 10.1590/1519-6984.260818.

*Tigabu M.* Characterization of forest tree seed quality with near infrared spectroscopy and multivariate analysis: PhD Thesis. 2003. 56 p.

*Tigabu M., Oden P.C., Shen D.* Application of near-infrared spectroscopy for the detection of internal insect infestation in *Picea abies* seed lots // Canadian Journal of Forest Research. 2004. Vol. 34, no. 1. P. 76–84. DOI: 10.1139/x03-189.

## References

- Bacherikov I.V. Sovershenstvovanie funktsionirovaniya zakrytykh skladov drevesnykh sypuchikh materialov: Abstr. Diss. ... Candidate of Technical Sciences. St. Petersburg: St. Petersburg State Forest Technical University, 2017. 21 p. (In Russ.)
- Bacherikov I.V., Raupova D.E., Durova A.S., Bragin V.D., Petrishchev E.P., Novikov A.I., Danilov D.A., Zhigunov A.V. Coat Colour Grading of the Scots Pine Seeds Collected from Faraway Provenances Reveals a Different Germination Effect. *Seeds*, 2022, vol. 1, no. 1, pp. 49–73. DOI: 10.3390/seeds1010006.
- Bernardes R.C., De Medeiros A., Silva L. da, Cantoni L., Martins G.F., Mastrangelo T., Novikov A., Mastrangelo C.B. Deep-Learning Approach for *Fusarium* Head Blight Detection in Wheat Seeds Using Low-Cost Imaging Technology. *Agriculture*, 2022, vol. 12, no. 11, art. no. 1801. DOI: 10.3390/agriculture12111801.
- Daneshvar A., Tigabu M., Karimidoost A., Oden P.C. Single seed Near Infrared Spectroscopy discriminates viable and non-viable seeds of *Juniperus polycarpos*. *Silva Fennica*, 2015, vol. 49, no. 5, art. no. 1334. DOI: 10.14214/sf.1334.
- Devetaković J., Krinulović L., Jancović I.K. Effect of sowing pattern and density on the quality of one-year-old Austrian pine bareroot seedlings. *Reforesta*, 2020, no. 10, pp. 25–30. DOI: 10.21750/refor.10.03.86.
- Durova A.S., Zhigunov A.V. Vliyanie biouglya na vskhozhest' semyan i rost seyantsev khvojnykh porod v usloviyakh zakrytogo grunta. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2017, iss. 219, pp. 18–31. DOI 10.21266/2079-4304.2017.219.18-31. (In Russ.)
- Egbäck S., Bullock B.P., Isik F., McKeand S.E. Height-Diameter Relationships for Different Genetic Planting Stock of Loblolly Pine at Age 6. *Forest Science*, 2015, vol. 61, no. 3, pp. 424–428. DOI: 10.5849/forsci.14-015.
- Farhadi M., Tigabu M., Oden P.C. Near Infrared Spectroscopy as non-destructive method for sorting viable, petrified and empty seeds of *Larix sibirica*. *Silva Fennica*, 2015, vol. 49, no. 5, art. no. 1340. DOI: 10.14214/sf.1340.
- Farhadi M., Tigabu M., Stener L.-G., Oden P.C. Feasibility of visible + near infrared spectroscopy for non-destructive verification of European × Japanese larch hybrid seeds. *New Forests*, 2016, vol. 47, no. 2, pp. 271–285. DOI: 10.1007/s11056-015-9514-4.
- Farhadi M., Tigabu M., Pietrzykowski M., Danusevičius D., Oden P.C. Application of near infrared spectroscopy for authentication of *Picea abies* seed provenance. *New Forests*, 2017, vol. 48, no. 5, pp. 629–642. DOI: 10.1007/s11056-017-9589-1.
- Golub Yu.I. Otsenka kachestva tsifrovых izobrazheniy. *Sistemnyy analiz i prikladnaya informatika*, 2021, no. 4, pp. 4–15. DOI 10.21122/2309-4923-2021-4-4-15. (In Russ.)

Gomes, É.S., Foseca de Oliveira G.R., Rodrigues A.A., Corrêa C.G., Almeida E. de, Carvalho H.W.P. de, Arthur V., Silva E.A.A. da, Novikov A.I., Mastrangelo C.B. Ultrasound technology supplements zinc in soybean seeds and increases the photosynthetic efficiency of seedlings. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024, vol. 227, art. no. 109619. DOI: 10.1016/j.compag.2024.109619.

Ivetić V., Grossnickle S., Škorić M. Forecasting the field performance of Austrian pine seedlings using morphological attributes. *IForest*, 2017, vol. 10, no. 1, pp. 99–107. DOI: 10.3832/ifor1722-009.

Jiang L., Xu X., Cai Q., Han R., Tigabu M., Jiang T., Zhao X. Variations in Growth and Photosynthetic Traits of Polyploid Poplar Hybrids and Clones in Northeast China. *Genes*, 2022, vol. 13, no. 11, art. no. 2161. DOI: 10.3390/genes13112161.

Kerkez I., Nonić M., Devetaković J., Šijačić-Nikolić M., Ivetić V. The effect of half-sib lines on morphological attributes of one-year old *Fraxinus angustifolia* seedlings. *Reforesta*, 2018, no. 5, pp. 15–21. DOI: 10.21750/REFOR.5.03.49.

Lebedev A.V. Prognozirovanie rosta po sredney vysote kul'tur sosny s ispol'zovaniem obobshchennogo algebraicheskogo raznostnogo podkhoda. *Iz-vestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2022, iss. 238, pp. 49–66. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.238.49-66. (In Russ.)

Mañas P., Castro E., Heras J. de las. Quality of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) seedlings using waste materials as nursery growing media. *New Forest*, 2009, vol. 37, iss. 3, pp. 295–311.

Monich Yu.I., Starovojtov V.V. Mera otsenki rezkosti tsifrovogo izobrazheniya. *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki*, 2011, no. 1, pp. 80–84. (In Russ.)

Nagimov Z.Ya. Zakonomernosti rosta i formirovaniya nadzemnoy fitomassy sosnovykh drevostoev: Diss. ... Doctor of Agricultural Sciences. Ekaterinburg: UGLTA, 2000. 409 p. (In Russ.)

Nigul K., Padari A., Kivistö A.Noe S.M., Korjus H., Laarmann D., Frelich L.E., Jõgiste K., Stanturf J.A., Paluots T., Põldveer E., Kängsepp V., Jürgenson H., Metslaid M., Kangur A. The Possibility of Using the Chapman–Richards and Näslund Functions to Model Height–Diameter Relationships in Hemiboreal Old-Growth Forest in Estonia. *Forests*, 2021, vol. 12, no. 2, art. no. 184. DOI: 10.3390/f12020184.

Novikov A.I. Diskovye separatory semyan v lesokhozyajstvennom proizvodstve. Voronezh: Voronezhskij gosudarstvennyj lesotekhnicheskij universitet im. G.F. Morozova, 2017. 159 p. (In Russ.)

Novikov A.I. Ekspress-analiz lesnykh semyan biofizicheskimi metodami. Voronezh: Voronezhskij gosudarstvennyj lesotekhnicheskij universitet im. G.F. Morozova, 2018. 128 p. (In Russ.)

Novikov A.I. Vliyanie sortirovaniya semyan sosny obyknovennoj po tsvetu i razmeram na ikh gruntovuyu vskhozhest' v kontejnerakh. *Khvojnye boreal'noj zony*, 2019a, vol. 37, no. 5, pp. 313–319. (In Russ.)

Novikov A.I. Nekotorye rezul'taty aprobatsii tekhnologii separatsii po kolichestvennomu priznaku semyan sosny obyknovennoj. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2019b, vol. 227, pp. 68–87. DOI: 10.21266/2079-4304.2019.227.68-87. (In Russ.)

Novikov A.I. Sovrshennstvovanie tekhnologii polucheniya vysokokachestvennogo lesosemennogo materiala: Abstr. Diss. ... Doctor of Technical Sciences. Voronezh, 2021. 32 p. (In Russ.)

Novikov A.I., Ivetić V. The effect of seed size grading on seed use efficiency and height of one-year-old container-grown Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings. *Reforesta*, 2018, vol. 6, pp. 100–109. DOI: 10.21750/REFOR.6.08.61.

Novikov, A. I., Ivetić V. The effect of seed coat color grading on height of one-year-old container-grown Scots pine seedlings planted on post-fire site. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, art. no. 012043. DOI: 10.1088/1755-1315/226/1/012043.

Novikov A., Sokolov S., Drapalyuk M., Zelikov V., Ivetić V. Performance of Scots pine seedlings from seeds graded by colour. *Forests*, 2019, vol. 10, no. 12, art. no. 1064. DOI: 10.3390/F10121064.

Novikov A.I., Lisitsyn V.I., Tigabu M., Tylek P., Chuchupal S. Detection of Scots pine single seed in optoelectronic system of mobile grader: Mathematical modeling. *Forests*, 2021, vol. 12, no. 2, pp. 1–18. DOI: 10.3390/f12020240.

Novikov A.I., Drapalyuk M.V., Sokolov S.V., Novikova T.P. Ekspress-analiz semyan v lesokhozyajstvennom proizvodstve: teoreticheskie i tekhnologicheskie aspekty. Voronezh: Voronezhskij gosudarstvennyj lesotekhnicheskij universitet im. G.F. Morozova, 2022. 176 p. (In Russ.)

Novikov A.I., Rebko S.V., Novikova T.P., Petrishchev E.P. Indeks kachestva Diksona: svyaz' s tekhnologicheskim vozdejstviem na lesnye semena. *Lesotekhnicheskiy zhurnal*, 2023a, vol. 13, no. 1, pp. 23–36. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.1/2. (In Russ.)

Novikov A.I., Rebko S.V., Novikova T.P., Petrishchev E.P. Vliyanie individual'noj massy semyan sosny obyknovennoj (*Pinus sylvestris* L.) sorta «Negorelskaya» na 30-dnevnoe prorastanie v 40-yacheistykh SideSlit-kontejnerakh. *Lesotekhnicheskiy zhurnal*, 2023b, vol. 13, no. 2 (50), pp. 59–86. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.2/4. (In Russ.)

Novikov A.I., Rebko S.V., Novikova T.P., Petrishchev E.P. Issledovanie spektrometricheskikh pokazatelej semyan kak osnova intensifikatsii protsessa lesovyrashchivaniya kul'tur sosny obyknovennoj sorta “Negorelskaya”: grant RNF 23-26-00228. Moscow: Rossijskij nauchnyj fond, 2023c. URL: <https://elibrary.ru/jtxu> (accessed: 01.10.2024) (In Russ.)

Novikova T.P. The choice of a set of operations for forest landscape restoration technology. *Inventions*, 2022, vol. 7, no. 1, art. no. 1. DOI: 10.3390/inventions7010001.

*Novikova, T.P. Assessment of the forest seed material quality at the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) experimental site during adaptive restoration of forest landscapes. *Forestry Engineering Journal*, 2023, vol. 13, no. 1, pp. 112–128. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.1/8.*

*Novikova T.P. Tekhnologicheskij passport «semya – kul'tura»: identifikatsiya parametrov RGB-yarkosti i tsvetnosti individual'nykh semyan *Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya na osnove avtorskoj metodiki. *Lesotekhnicheskiy zhurnal*, 2024, vol. 14, no. 3(55), pp. 37–60. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2024.3/3. (In Russ.)*

*Novikova T.P., Malysheva V.I., Petrishchev E.P. Vliyanie klimaticheskogo indeksa graduso-dnej na vitalitet 3-letnikh seyantsev sosny obyknovennoj iz sortirovannykh po spektrometriceskim svojstvam semyan. *Lesotekhnicheskiy zhurnal*, 2022, vol. 12, no. 1(45), pp. 110–118. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2022.1/9. (In Russ.)*

*Novikova T.P., Lisitsyn V.I., Petrishchev E.P. Spravochnaya informatsionnaya sistema FLR-Library dlya adaptivnogo lesovosstanovleniya: klasternyj analiz deskriptorov. *Lesotekhnicheskiy zhurnal*, 2023, vol. 13, no. 3(51), pp. 164–179. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.3/12. (In Russ.)*

*Novikova T.P., Tylek P., Mastrangelo C.B., Drapalyuk M.V., Kharin S.V., Novikov A.I. The Root Collar Diameter Growth Reveals a Strong Relationship with the Height Growth of Juvenile Scots Pine Trees from Seeds Differentiated by Spectrometric Feature. *Forests*, 2023, vol. 14, no. 6, art. no. 1164. DOI: 10.3390/f14061164.*

*Petrishchev E.P. Issledovanie vzaimosvyazi biometricheskikh parametrov yuvenil'nykh seyantsev sosny obyknovennoj iz konditsionnykh semyan pri otsenke rezul'tatov lesovosstanovleniya. *Lesotekhnicheskiy zhurnal*, 2021, vol. 11, no. 4(44), pp. 161–169. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/14. (In Russ.)*

*Petrishchev E.P., Novikova T.P., Novikov A.I. Rezul'taty issledovanij posevnykh kachestv semyan sosny obyknovennoj (*Pinus sylvestris* L., sort Negorel'skaya) i opredeleniya indeksa kachestva Diksona 60-dnevnykh seyantsev v kontejnernom pitomnike. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registratsii bazy dannykh no. 2023624604 RF: no. 2023624416; decl. 01.12.2023; publ. 13.12.2023a. (In Russ.)*

*Petrishchev E.P., Novikova T.P., Rebko S.V., Novikov A.I. Rezul'taty morfometricheskikh issledovanij semyan sosny obyknovennoj (*Pinus sylvestris* L., sort Negorel'skaya). Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registratsii bazy dannykh no. 2023624679 RFno. 2023624380; decl. 01.12.2023; publ. 18.12.2023b. (In Russ.)*

*Petrishchev E.P., Novikova T.P., Novikov A.I. Rezul'taty issledovanij spektrometriceskikh pokazatelej semyan sosny obyknovennoj (*Pinus sylvestris* L., sort Nego-rel'skaya). Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registratsii bazy dannykh no. 2023624752 RF: no. 2023624389; decl. 01.12.2023; publ. 19.12.2023c. (In Russ.)*

*Pimenov A.V. Bioraznoobrazie sosny obyknovennoj (*Pinus sylvestris* L.) v kontrastnykh ekotopakh Yuga Sibiri: Diss. ... Doctor of Biological Sciences.*

Krasnoyarsk: Institut lesa im. V.N. Sukacheva Sibirskogo otdeleniya Rossijskoj akademii nauk, 2015. 406 p. (In Russ.)

*Poplavskaya L.F., Rebko S.V., Tupik P.V.* Rezul'taty rajonirovaniya sosny obyknovennoj sorta Negorelskaya v Respublike Belarus'. *Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe khozyajstvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyayemykh resursov*, 2021, vol. 1, no. 240, pp. 58–67. DOI: 10.52065/2519-402x-2021-240-7-58-67. (In Russ.)

*Priyatkin N.S.* Neinvazivnaya ekspress-otsenka raznokachestvennosti i khozyajstvennoj prigodnosti semennogo materiala na osnove ispol'zovaniya instrumental'nykh fizicheskikh metodov: Diss. ... Doctor of Biological Sciences. St. Petersburg: AFI, 2023. 253 p. (In Russ.)

*Rabko S.U., Novikov A.I., Novikova T.P., Petrishchev E.P.* Vzaimosvyazi mezhdu geometricheskimi i gravimetricheskimi parametrami semyan sosny obyknovennoj. *Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe khozyajstvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyayemykh resursov*, 2024a, vol. 276, pp. 66–76. DOI: 10.52065/2519-402H-2024-276-8. (In Russ.)

*Rabko S.U., Novikov A.I., Novikova T.P., Petrishchev E.P.* Kharakteristika proiskhozhdeniya iskhodnogo materiala sosny obyknovennoj (*Pinus sylvestris* L.) sorta «Negorelskaya». *Botanika (issledovaniya)*, 2024b, vol. 54, pp. 213–225. (In Russ.)

*Rodriguez de Prado D., Riofrío J., Aldea J., McDermott J., Bravo F., Aza C.H. de.* Species Mixing Proportion and Aridity Influence in the Height–Diameter Relationship for Different Species Mixtures in Mediterranean Forests. *Forests*, 2022, vol. 13, art. no. 119. DOI: 10.3390/f13010119.

*Santos C.C., Goelzer A., da Silva O.B., dos Santos F.H.M., Silverio J.M., Scalon S.P.Q., Vieira M.C., Zárate N.A.H.* Morphophysiology and quality of *Alibertia edulis* seedlings grown under light contrast and organic residue. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2023, vol. 27, no. 5, pp. 375–382. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v27n5p375-382.

*Sousa D.J.P., Nogueira G.A.S., Teixeira K.B.S., Monteiro G.G.T.N., Brito A.E.A., Nascimento V.R., Albuquerque G.P.D., Oliveira T.J.M., Souza L.C., Freitas J.M.N., Oliveira Neto C.F., Okumura R.S.* Mitigation of the effects of salt stress in cowpea bean through the exogenous application of brassinosteroid. *Brazilian Journal of Biology*, 2022, vol. 82, pp. 1–7. DOI: 10.1590/1519-6984.260818.

*Tigabu M.* Characterization of forest tree seed quality with near infrared spectroscopy and multivariate analysis: PhD Thesis. 2003. 56 p.

*Tigabu M., Oden P.C., Shen D.* Application of near-infrared spectroscopy for the detection of internal insect infestation in *Picea abies* seed lots. *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, vol. 34, no. 1, pp. 76–84. DOI: 10.1139/x03-189.

Материал поступил в редакцию 27.11.2024

**Новикова Т.П., Ребко С.В., Петрищев Е.П., Новиков А.И.** Ранний рост культур (*Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya), полученных из семян с известными спектрометрическими и морфометрическими параметрами // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 196–224. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.196-224

Цель исследования – пронаблюдать, оценить и проанализировать весь цикл получения лесного репродуктивного материала на примере сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) сорта «Негорельская», набирая банк данных, начиная от систематического изучения научного ландшафта по влиянию спектральных и морфометрических показателей индивидуальных семян на показатели полученных из них культур до наблюдения биометрических параметров онтогенетического развития сеянца/саженца на ювенильном этапе с учетом природно-производственных условий произрастания и времени/возраста пересадки. Исследований, содержащих сведения о раннем росте индивидуальных саженцев *Pinus sylvestris* L. сорта «Негорельская» по биометрическому показателю отношения высоты к диаметру корневой шейки из семян с известными оптометрическими параметрами яркости достаточно мало. Объектом исследования выступили 494-дневные саженцы, выращенные в контейнерах лесного питомника, пересаженные на восстанавливаемый лесной ландшафт осенью без закаливания (первая группа: возраст от момента пересадки – 364 дня) и весной после 150-дневного закаливания (вторая группа: возраст – 214 дней), а также 497-дневные контейнерные сеянцы после 367-дневного закаливания, измеренные перед пересадкой. Проверку нуль-гипотезы производили в предположении, что средние варианты независимой переменной В/Д отношения статистически не дифференцированы в группах саженцев с разным временем пересадки. Для уточнения степени различия (или отсутствия различия) использовали множественное сравнение на основании пост-хок теста Тьюки. Закономерности изменения биометрического отношения высоты саженца к диаметру стволика у корневой шейки (В/Д отношения) в зависимости от шести оптометрических показателей семенной оболочки визуализировали с помощью скаттерплота и аппроксимирующей линии регрессии второй степени. В будущем, проследив прирост саженцев сосны обыкновенной сорта «Негорельская» по высоте и диаметру на втором и последующих вегетационных периодах ювенильного этапа на восстанавливаемом участке лесного ландшафта, возможно будет точнее установить степень интенсификации лесовосстановительного производства *P. sylvestris* L. var. Negorelskaya в зависимости от начальных свойств семени.

**Ключевые слова:** сосна обыкновенная, сорт «Негорельская», ювенильная стадия, ранний рост, биометрия саженцев, отношение высоты к диаметру корневой шейки, RGB-оптометрия семян, морфометрия семян, FLR-библиотека.

**Novikova T.P., Rabko S.U., Petrishchev E.P., Novikov A.I.** Early growth of seedling (*Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya) obtained from seeds with known spectrometric and morphometric features. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 196–224 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.196-224

The research aim is to observe, evaluate and analyze the entire cycle of obtaining forest reproductive material using the example of the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) od the Negorelskaya cultivar, collecting a data bank, starting from a systematic study of the scientific landscape on the influence of spectral and morphometric indicators of individual seeds on the indicators of crops obtained from them to observation biometric parameters of the ontogenetic development of a seedling/sapling at the juvenile stage, taking into account the natural production conditions of growth and the time/age of transplantation. There are few studies containing information on the early growth of individual seedlings of *Pinus sylvestris* L. of the Negorelskaya cultivar according to the biometric indicator of the ratio of height to diameter of the root neck of seeds with known optometric brightness parameters. The object of the study were 494-day-old seedlings grown in the containers of a forest nursery, transplanted to a regenerated forest landscape in autumn without hardening (the first group: age from the moment of re-planting – 364 days) and in spring after 150 days of hardening (the second group: age – 214 days), as well as 497-daily container seedlings after 367 days of hardening, measured before transplanting. The null hypothesis was tested under the assumption that the average variants of the independent variable H/D ratio were not statistically differentiated in groups of seedlings with different transplant times. To clarify the degree of difference (or lack of difference), a multiple comparison based on the post-hoc Tukey test was used. The patterns of changes in the biometric ratio of the height of the seedling to the diameter of the root neck (H/D ratio) depending on six optometric parameters of the seed coat were visualized using a scatterplot and an approximating regression line of the second degree. In the future, by tracing the growth of seedlings of the *Pinus sylvestris* L. Negorelskaya cultivar in height and diameter during the second and subsequent growing seasons of the juvenile stage in the restored area of the forest landscape, it will be possible to more accurately determine the degree of intensification of the reforestation production of *Pinus sylvestris* L. of the Negorelskaya cultivar depending on the initial properties of the seed.

**Keywords:** Scots pine, *Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya, juvenile stage, early growth, seedlings biometrics, Height/Diameter ratio, RGB-channels seed parameters, seed morphometry, FLR-Library.

---

**НОВИКОВА Татьяна Петровна** – доцент Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, кандидат технических наук. ORCID: 0000-0003-1279-3960. SPIN-код: 6783-5821. WoS ResearcherID: N-1272-2016. Scopus AuthorID: 57211295391.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: novikova\_tp.vgltu@mail.ru

**NOVIKOVA Tatyana P.** – PhD (Technical), Associate Professor of Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov. ORCID: 0000-0003-1279-3960. SPIN-code: 6783-5821. WoS ResearcherID: N-1272-2016. Scopus AuthorID: 57211295391.

394087. Timiryazeva str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: novikova\_tp.vgltu@mail.ru

**РЕБКО Сергей Владимирович** – заведующий кафедрой лесных культур и почвоведения Белорусского государственного технологического университета, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент. ORCID: 0000-0002-6892-2859. SPIN-код: 8060-2777. WoS ResearcherID: AAS-6402-2021. Scopus AuthorID: 57315692200.

220006, ул. Свердлова, д. 13а, г. Минск, Республика Беларусь. E-mail: rebko@belstu.by

**RABKO Siarhei U.** – PhD (Agriculture), Head of the Department of Forest Crops and Soil Science of Belarusian State Technological University. ORCID: 0000-0002-6892-2859. SPIN-code: 8060-2777. WoS ResearcherID: N-1272-2016. Scopus AuthorID: 57315692200.

220006. Sverdlova str. 13a. Minsk. Republic of Belarus. E-mail: rebko@belstu.by

**ПЕТРИЩЕВ Евгений Петрович** – младший научный сотрудник Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, кандидат технических наук. ORCID: 0000-0002-1395-3631. SPIN-код: 7169-8420. Scopus AuthorID: 57211291245.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: petrishchev.vgltu@mail.ru

**PETRISHCHEV Evgeniy P.** – PhD (Technical), junior researcher of Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov. ORCID: 0000-0002-1395-3631. SPIN-code: 7169-8420. Scopus AuthorID: 57211291245.

394087. Timiryazeva str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: petrishchev.vgltu@mail.ru

**НОВИКОВ Артур Игоревич** – ведущий научный сотрудник Агрофизического научно-исследовательского института, отдел 140 – управления агротехнологиями и агромониторингом, доктор технических наук, доцент. ORCID: 0000-0003-1230-0433. SPIN-код: 7957-7466. WoS ResearcherID: N-1225-2016. Scopus AuthorID: 57207453678.

195220, Гражданский пр., д. 14, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: arthur.novikov@agrophys.ru

**NOVIKOV Arthur I.** – DSc (Technical), Leading Researcher, Agrophysical Research Institute, Department 140 – Management of Agricultural Technologies and Agricultural Monitoring, Associate Professor. ORCID: 0000-0003-1230-0433. SPIN-code: 7957-7466. WoS ResearcherID: N-1225-2016. Scopus AuthorID: 57207453678.

195220. Grazhdansky av. 14. St. Petersburg. Russia. E-mail: arthur.novikov@agrophys.ru