

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/3>

УДК 630.232 : (004.652.4 + 303.722.4)



## Технологический паспорт «семя – культура»: идентификация параметров RGB-яркости и цветности индивидуальных семян *Pinus sylvestris* L. var. *Negorelskaya* на основе авторской методики

Татьяна П. Новикова ✉, [novikova\\_tp.vglta@mail.ru](mailto:novikova_tp.vglta@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0003-1279-3960>

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

Использование оптометрических параметров внешней оболочки семян в RGB-пространстве как неразрушающего маркера для идентификации подгрупп семян с различным качеством прорастания может привести к лучшему пониманию физиологической основы всхожести семян и применению методик глубокого обучения нейросети для интенсификации процесса лесовыращивания. Исследований о прорастании семян с известными оптометрическими параметрами RGB-яркости и цветности внешней оболочки индивидуальных семян все еще достаточно мало. Были отобраны обескрыленные индивидуальные семена *Pinus sylvestris* L. var. *Negorelskaya* ( $N = 1200$ ), представляющие собой ценный генетический материал на основе множества климатипов. На основе авторской методики формирования технологического паспорта определяли параметры RGB-яркости и цветности внешней оболочки данных семян на основе сегментированных сканов, полученных на приборе с зарядовой связью Brother DCP-1510. Семена высевали вручную в прямоугольные контейнеры объемом ячейки 120 кубических сантиметров с размерностью  $5 \times 8$  ячеек и фиксировали дихотомический показатель всхожести (0 – не взошло, 1 – взошло) на 30 и 50 дни для каждого семени. Проверяли гипотезу  $H_0$  об отсутствии различий показателей RGB-яркости и RGB-цветности внешней оболочки семени в группах с нулевой и ненулевой всхожестью при фиксированном уровне значимости  $\alpha = 0,05$  с помощью ANOVA F-критерия или ANOVA W-критерия Уэлча в зависимости от статистики однородности дисперсий Ливиня. Межквартильный размах IQR индивидуальных оптометрических показателей высеванных семян составляет для количественных вариантов RGB-яркости 27 единиц ( $m$ ; SD; | 82; 21) и для вариантов RGB-цветности 0,174 относительных единицы ( $m$ ; SD; | 0,189; 0,107) соответственно. Наблюдаемые различия между средними статистиками показателей RGB-яркости ( $M$  | 78; SD | 18) и RGB-цветности ( $M$  | 0,177; SD | 0,104) внешней оболочки семян *P. sylvestris* L. var. *Negorelskaya* в группе ненулевой ( $N = 942$ ) всхожести и средними статистиками показателей ( $M$  | 96; SD | 25;  $M$  | 0,235; SD | 0,103) в группе нулевой ( $N = 258$ ) всхожести неслучайны ( $p = 1,5986e-23$ ;  $p = 4,6857e-15$ ). Внедрение результатов даст возможность при реализации технологии выращивания посадочного материала сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L. var. *Negorelskaya*) с ЗКС исследовать ювенильный период роста и развития лесных культур в естественных природно-производственных условиях и разместить результаты в индивидуальном для каждого растения технологическом паспорте «семя – культура».

**Ключевые слова:** восстановление лесных ландшафтов, семена, сосна обыкновенная, сорт «Негорельская», обработка изображений, оптометрические параметры, RGB-пространство, технологический паспорт «семя – культура», FLR-Library

**Финансирование:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-26-00228, <https://rscf.ru/project/23-26-00228/>.

**Заявление о доступности данных:** исходные TIFF-файловые данные индивидуальных семян *Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya с разрешением 300, 600 и 1200 точек на дюйм, полученные по авторской методике для данного исследования, представлены в открытом доступе в научном репозитории – [набор данных] Novikova, Tatyana P.; Novikov, Arthur I.; Petrishchev, Evgeniy P. (2023), “VIS-Spectrometric data of individual seeds (N = 1200) of the Negorelskaya variety *Pinus sylvestris* L. (empirical dataset)”, Mendeley Data, V3, doi: <https://doi.org/10.17632/dt78jhyw2j.3>.

**Благодарности:** автор благодарит рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

**Конфликт интересов:** автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Новикова Т. П. Технологический паспорт «семя-культура»: идентификация параметров RGB-яркости и цветности индивидуальных семян *Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya на основе авторской методики / Т. П. Новикова // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 3 (55). – С. 37–60. – Библиогр.: с. 53–59 (51 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/3>.

*Поступила* 13.09.2024. *Пересмотрена* 08.10.2024. *Принята* 09.10.2024. *Опубликована онлайн* 11.11.2024.

## Article

### "Seed – culture" technological passport: RGB-brightness and RGB-saturation identification of *Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya individual seeds based on the author's technique

Tatyana P. Novikova ✉, [novikova\\_tp.vglta@mail.ru](mailto:novikova_tp.vglta@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0003-1279-3960>

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation

#### Abstract

The use of optometric parameters of the outer shell of seeds in RGB space as a non-destructive marker for identifying subgroups of seeds with different germination quality can lead to a better understanding of the physiological basis of seed germination and the use of deep neural network learning techniques to intensify the reforestation process. There are still quite few studies on the germination of seeds with known optometric parameters of RGB brightness and chromaticity of the outer shell of individual seeds. De-winged individual seeds of *Pinus sylvestris* L. var. Negorelskaya were selected (N = 1200), representing valuable genetic material based on a variety of climatypes. Based on the author's method of forming a technological passport, the RGB brightness and RGB chromaticity parameters of the outer shell of these seeds were determined based on segmented scans obtained on a Brother DCP-1510 charge-coupled device. The seeds were sown manually in rectangular containers with a cell volume of 120 cubic centimeters with a dimension of 5 × 8 cells and a dichotomous germination index (0 – did not germinate, 1 – ripened) was fixed for 30 and 50 days for each seed. The H<sub>0</sub> hypothesis was tested on the absence of differences in RGB brightness and RGB chromaticity of the outer shell of the seed in groups with zero and non-zero germination at a fixed level of significance  $\alpha = 0.05$  using the ANOVA F-criterion or the ANOVA Welch-criterion, depending on the statistics of uniformity of the Levene's dispersions. The interquartile range of IQR of individual optometric indicators of sown seeds is 27 units (m ; SD; | 82 ; 21) for the quantitative RGB brightness variant and 0.174 relative units (m ; SD; | 0.189; 0.107) for the RGB chromaticity variant, respectively. The observed differences between the average statistics of RGB brightness (m | 78; SD | 18) and RGB chromaticity (m | 0.177; SD | 0.104) of the outer shell of the seeds of *P. sylvestris* L. var. Negorelskaya in the group of

non-zero ( $N = 942$ ) germination and average statistical indicators ( $m | 96$ ;  $SD | 25$ ;  $M | 0.235$ ;  $SD | 0.103$ ) in the group of zero ( $N = 258$ ) germination are not accidental ( $p = 1.5986e-23$ ;  $p = 4.6857e-15$ ). The implementation of the results will make it possible to implement the technology of growing the containerized planting material of Scots pine (*P. sylvestris* L. var. *Negorelskaya*) to investigate the juvenile period and development of forest crops in natural production conditions and place the results in an individual technological passport for each plant "seed – culture".

**Keywords:** *forest landscape restoration, Pinus sylvestris* L. var. *Negorelskaya*, individual seeds; image processing, optometric parameters, RGB space, «seed – culture» technological passport, FLR-Library

**Funding:** this study has been supported by the grants the Russian Science Foundation, RSF 23-26-00228, <https://rscf.ru/project/23-26-00228/>.

**Data Availability Statement:** initial TIFF file data of individual *Pinus sylvestris* L. var. *Negorelskaya* seeds a resolution of 300, 600 and 1200 dpi, obtained using the author's technique for this study, are openly available in [dataset] Novikova, Tatyana P.; Novikov, Arthur I.; Petrishchev, Evgeniy P. (2023), "VIS-Spectrometric data of individual seeds ( $N = 1200$ ) of the *Negorelskaya* variety *Pinus sylvestris* L. (empirical dataset)", Mendeley Data, V3, doi: <https://doi.org/10.17632/dt78jhyw2j.3>.

**Acknowledgments:** the author thanks the reviewers of their contribution to the expert evaluation of the article.

**Conflict of interest:** the author declares no conflict of interest.

**For citation:** Novikova T.P. (2024). "Seed – culture" technological passport: RGB-brightness and RGB-saturation identification of *Pinus sylvestris* L. var. *Negorelskaya* individual seeds based on the author's technique. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 3 (55), pp. 37-60 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/3>.

**Received** 13.09.2024. **Revised** 08.10.2024. **Accepted** 09.10.2024. **Published online** 11.11.2024.

## Введение

В современном лесном хозяйстве, – рассуждают Д.А. Стэнтурф и соавторы (2024) – «восстановление лесов многогранно и выходит за рамки простой посадки деревьев, имеющих фундаментальное значение для данного процесса [49]». Изучение и сохранение биоразнообразия лесных видов, например, по С. Хейнрихс и др. (2019), «размещением древесных пород в разных чистых насаждениях, объединенных в ландшафтном масштабе, а не в смесях древостоев [24]» является важной задачей, что подтверждается исследованиями И.Д. Самсоновой и соавторов (2019) [45], В.А. Славского и соавторов (2022) [46]. Одним из ключевых аспектов в этой области является, по мнению В. Иветича и А.И. Новикова (2019), сохранение и улучшение качества лесного репродуктивного материала [25; 34], включая семена.

Традиционная практика, представленная в научном обзоре А.И. Новикова и М.В. Драпалюка (2018) [4], А.И. Новикова и соавторов (2020) [30], автоматизированной подготовки семян хвойных видов к высеванию разделением по геометрической составляющей вызывает некоторую обеспокоенность, подробнее описанную в научном обзоре В. Иветича и соавторов (2016)<sup>1</sup>, «по поводу сокращения генетического разнообразия путем направленного отбора».

Рост из дифференцированных по оптическому и геометрическому признакам семян однолетних контейнерных семян *P. sylvestris* в теплице и площадке для закаливания автоматизированного лесного питомника, рассмотренный А.И. Новиковым и В. Иветичем (2018, 2019) [31; 32] обнаружил статистически значимые различия между биометрическими параметрами семян, произведенных из

<sup>1</sup>Ivetić, V. Genetic diversity and forest reproductive material – from seed source selection to planting / V. Ivetić, J. Devetaković, M. Nonić

et al. // iForest - Biogeosciences and Forestry. – 2016. – Vol. 9. – № 5. – P. 801-812. – DOI: <https://doi.org/10.3832/ifer1577-009>.

разных групп семян. А.И. Новиков и В.В. Саушкин (2018) [13] изучили с помощью Фурье-спектрометра закономерности пропускания оптического пучка в ближнем инфракрасном диапазоне сквозь внешнюю оболочку органолептически отобранных желтовато-белых, охряных и темно-бурых семян *P. sylvestris*.

Наряду с этим, апробация технологии, разработанной А.И. Новиковым (2018, 2021) [7; 8], экспресс-классификации с помощью оптоэлектронных систем С.В. Соколова и соавторов [47] семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) по оптическим свойствам семенной оболочки с использованием экспресс-анализаторов [1; 3; 48], указывает для светлых семян (класс окраски 1 – диапазон длин волн 650-715 нм; степень отражения 70-85 %, по А.И. Новикову | 2019 [29]) сбора из естественных древостоев Павловского района Воронежской области, по данным А.И. Новикова и соавторов (2019), на «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 [36]». Семена идентифицировались группами, не индивидуально, поэтому исследователи анонсировали «отслеживание пути каждой фракции семян от обработки семян до роста и продуктивности саженцев в полевых условиях путем интеграции всех параметров лесного репродуктивного материала (FRM) в базу данных FRM-Library, что было частично реализовано в работе А.И. Новикова и соавторов (2019) [33] и явилось своего рода прототипом технологического паспорта от семени к культуре.

Начался предварительный сбор табличных и файловых данных, и в 2023 году была выдвинута гипотеза, что дифференциация семян по их оптическим свойствам может повысить эффективность процесса лесовыращивания. Для проверки гипотезы был разработан план исследований, включающий методику сбора данных (оптометрических, морфометрических, гравиметрических, физиологических, биометрических, технологических) для каждого сортового семени сосны обыкновенной сорта «Негорельская» и полученного из него сеянца индивидуально. Происхождение сорта и его особенности (свидетельство на сорт №0003707 Государственной инспекции по испытанию и охране сортов растений

Республики Беларусь, выданное 31.12.2013) подробно описаны учеными-селекционерами БГТУ С.В. Ребко, Л.Ф. Поплавской и др. (2021) [18]. Сорт характерен ранним и обильным гроздевидным семеношением и интенсивным ростом.

Запланированный объем исследований был принят к исполнению при поддержке гранта РФФИ 23-26-00228. 30 мая 2024 года на I Международном инженерном форуме Института лесных, горных, и строительных наук Петрозаводского государственного университета научной аудитории в очном формате были доложены итоги работы по проекту за 2023 год. Исследователями по проекту, каждым в соответствии с запланированными видами работ, выполнено следующее:

1) Т.П. Новикова и соавторы (2023) [38] получили новые результаты систематического анализа, соответственно структурированные в виде базы данных [14], трендов научного ландшафта в области исследования спектрометрических показателей лесных семян, категоризируемые по 8 критериям эффективности и подтверждающие статистически достоверную возможность использования оптических показателей семян в RGB-пространстве видимого диапазона длин волн.

2) автор разработала новую методику, предварительно депонированную на платформе preprint.org [42] (на дату 25 августа 2024 года препринт имел 53 просмотра и 130 загрузок), проведения исследований спектральных показателей, файловый набор данных которых структурирован в базу данных [9], отдельных семян *P. sylvestris* var. *Negorelskaya* в RGB-пространстве. Методика подробно рассмотрена в разделе М&М данной рукописи, и может дополняться и универсализоваться в будущем по мере появления новых данных и новых способов инструментальной поддержки.

3) С.В. Ребко и соавторы (2023) получили новые результаты лабораторных исследований морфометрических и гравиметрических показателей индивидуальных семян ( $N = 1200$ ) *P. sylvestris* var. *Negorelskaya*, соответственно структурированные в виде базы данных [17], демонстрирующие, что «при уменьшении показателей средней площади поверхности и объема семени коэффициент вариации при

этом увеличивается, размах признака также увеличивается, а медианные значения данных показателей снижаются [20]».

4) А.И. Новиков и соавторы (2023) [10] получили новые результаты исследования влияния массы индивидуального семени *P. sylvestris* var. *Negorelskaya*, включенной в технологический паспорт «семя – культура», на всхожесть в 40-ячеистых сайд-слит контейнерах на 30 день с момента высевания. Также Е.П. Петрищевым и соавторами (2023) [16] сформирован набор данных биомассы полученными индивидуальными семенами *P. sylvestris* var. *Negorelskaya* контейнерных сеянцев [14], включающий один из показателей качества контейнерных сеянцев – индекс Диксона DQI, как определено А.И. Новиковым и соавторами (2023) [11], изменение которого «в большинстве случаев может быть аппроксимировано полиномом второго порядка [11]».

5) Т.П. Новикова и соавторы (2023) получили дополнительные результаты исследования по разработке FLR-алгоритма нечеткой логики [41], управляющего действиями детектирующей системы для анализа семян сосны обыкновенной в ИК-диапазоне длин волн, учитывающего погрешности измерения длины волны и её амплитуды.

5) 31 октября 2023 года Т.П. Новиковой и А.И. Новиковым на территории Левобережного лесничества Учебно-опытного лесхоза Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова (394050, г. Воронеж, Железнодорожный район, кордон Боровской), 99 квартала, координаты узловой точки – начала строки – (51°46'34.2"N 39° 1 8'57.6"E) заложен новый объект испытательных культур (*Pinus sylvestris* L. var. *Negorelskaya*) путем пересадки индивидуальных, соответствующих семенам растений из сайд-слит контейнеров на дно борозды под меч Колесова.

В рамках п. 1 плана на 2024 год по проекту «Исследование спектрометрических показателей семян как основа интенсификации процесса лесовыращивания культур сосны обыкновенной сорта «Негорельская» [12] обозначена задача, требующая уточ-

нения термина «паспорт» для индивидуального растения начиная от семени до культуры, а также уточнение техники инструментального определения оптометрических свойств для сортовых семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L. var. *Negorelskaya*). На пошаговом решении данной задачи базируются результаты данного исследования, направленного на разработку и информационную поддержку технологического паспорта «семя – культура» для индивидуальных семян *P. sylvestris* var. *Negorelskaya*.

Как отмечает во введении к Формам внутривидовой изменчивости... Станислав Александрович Мамаев<sup>1</sup> (1973), «в лесу трудно найти два дерева, совершенно одинаковых по своим признакам (с. 5)» Идея использования паспорта единичного семени / зерновки в качестве индикатора качества посадочного материала в той или иной степени рассматривалась в начале 2020-х годов для семян лесных и сельскохозяйственных культур в виде «параметрического паспорта» Нгуен Куинь Чанг и соавторами (2021) [28], М.В. Архиповым и соавторами (2023) [2], Н.С. Прияткиным (2024) [19] и независимо от них автором – Т.П. Новиковой (2022) в виде «FLR-approach passport [39]», Т.П. Новиковой с соавторами (2023) в виде «...passport of the tree [43]». Индивидуально отмеченные деревья, около 17 000 особей у Нельсона Тиффо и соавторов (2024) [50], используются как объекты средне- и долгосрочных исследований виталитета и роста лесных культур для оценки адаптивных стратегий лесоводства при изменении климата.

Цель исследования – на основании разработанной методики формирования технологического паспорта «семя – культура» изучить закономерности изменения параметров яркости и цветности индивидуальных семян *P. sylvestris* var. *Negorelskaya*.

### Материалы и методы

#### Объект и предмет исследования

В исследовании были использованы 1200 индивидуальных сортовых семян *Pinus sylvestris* L. var. *Negorelskaya*, которые представляют собой ценный

<sup>1</sup>Мамаев, С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений (на примере семейства Pinaceae на Урале) / С.А. Мамаев. – М. : Наука, 1973. – 284 с.

генетический материал, полученный от гибридизации семенного потомства пяти климатических экотипов *P. sylvestris* var. *Negorelskaya*: Белгородского, Воронежского, Саратовского, Кировского и Минского.

Предмет исследований – закономерности изменения параметров RGB-яркости и цветности семенной оболочки *P. sylvestris* var. *Negorelskaya* как составляющих технологического паспорта «семя – культура».

### *Сбор данных*

Для получения данных разработали методику формирования технологического паспорта «семя – культура», объединяющую усовершенствованные способы: подготовки и транспортировки семян к месту исследования, инструментальной параметрической идентификации, формирования информационных блоков технологического паспорта. Методика справедлива как для семян *P. sylvestris* var. *Negorelskaya*, использованных в данном эксперименте, так и для интерпретации под конкретные семена других лесных древесных и кустарниковых видов с обязательным уточнением отдельных шагов на основании технологических свойств [8; 9] изучаемых семян и технологических запросов потребителя.

### *1) Подготовка и транспортировка семян*

Сформировали сидлот (анализируемый образец семян) *P. sylvestris* L. var. *Negorelskaya*, используя метод квартования (крестообразного деления) или любые другие методы, обеспечивающие репрезентативность и рандомизированность выборки. При этом каждое индивидуальное семя не должно иметь крылатки, и быть выдержанным не менее 24 часов в лаборатории при температуре около 23-25 градусов Цельсия после извлечения с места хранения (традиционно семена *P. sylvestris* хранятся в стеклянной таре при низкой положительной температуре до плюс 5 градусов Цельсия и низким уровнем влажности 7.5-8 %, как показано у А.И. Новикова и соавторов | 2019 [36]).

Операцию перемещения семян от места экспресс-анализа к месту высева осуществляли в индивидуальных прозрачных кармашках, расположенных на одном перфорированном листе формата А4.

### *2) Инструментальная параметрическая идентификация семени (экспресс-анализ)*

Выполняли операцию *раскладки* индивидуальных семян *P. sylvestris* L. var. *Negorelskaya* из соответствующих индивидуальных перфорированных кармашков на предметное стекло в соответствии с рис. 1 перед получением оптического скана в количестве и порядке размещения семян, соответствующем количеству и порядку размещения семян при высевании в соответствующую ячейку контейнера автоматизированного лесного питомника (в данном исследовании 40-ячейный 5\*8), причем ориентация семян относительно вертикальной оси обеспечивала рандомизированное расположение микропиле семени для обеспечения репрезентативности выборки, по аналогии с Родриго Бернардесом и соавторами (2022) [21].

Выполняли операцию *подбора цветовой подложки* при формировании оптических ТП-параметров семени *P. sylvestris* L. var. *Negorelskaya* на оборудовании с зарядовой связью (Brother DCP-1510, КНР) с целью достижения максимальной точности при последующей сегментации сканов.

Выполняли операцию сканирования предметного стекла с разложенными указанным образом семенами *P. sylvestris* L. var. *Negorelskaya* в видимом диапазоне длин волн с использованием оборудования с зарядовой связью с разрешением 300, 600 и 1200 точек на дюйм.

Выполняют операцию *переворачивания* каждого разложенного семени *P. sylvestris* L. var. *Negorelskaya* на 180 градусов относительно короткой горизонтальной оси, перпендикулярной воображаемой линии, проходящей через халазный выступ и микропиле, из одного устойчивого положения в другое устойчивое положение с целью получения квазидорсального и квазивентрального сканов из-за возможной цветовой дифференциации разных сторон внешней оболочки семени.

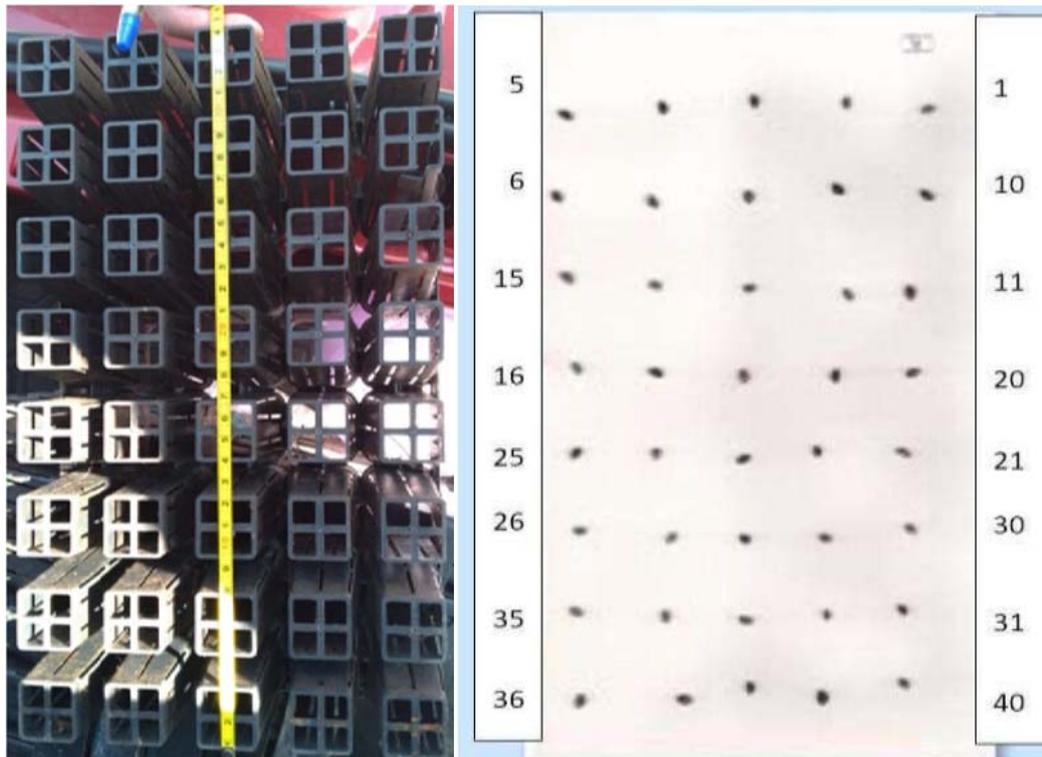
Сканировали предметное стекло с перевернутыми определенным образом семенами *P. sylvestris* L. var. *Negorelskaya* в видимом диапазоне длин волн с использованием оборудования с зарядовой связью с разрешением 300, 600 и 1200 точек на дюйм.

3) Создание экспериментальных культур *P. sylvestris* var. *Negorelskaya*

Перемещали семена в индивидуальных прозрачных кармашках, расположенных на одном перфорированном листе формата А4, от места экспресс-анализа к месту высевания.

Высевали каждое индивидуальное семя *P. sylvestris* L. var. *Negorelskaya* с известными характеристиками в субстрат кислой реакции по центру соответствующей ячейки многоячейкового контейнера.

Контейнер прямоугольной формы ориентировали таким образом, чтобы он имел 8 рядов и 5 строк: порядок высевания семян для рандомизации осуществляли волнообразно от левой нижней ячейки контейнера: в первый столбец «снизу – вверх» с 1 по 5 семя, во второй столбец «сверху – вниз» с 6 по 10 семя (см. рис. 4 в работе [10]) и так до правой части, до столбца 8 контейнера в соответствии с рис. 1, в.



Строка 5	5	6	15	16	25	26	35	36
Строка 4	4	7	14	17	24	27	34	37
Строка 3	3	8	13	18	23	28	33	38
Строка 2	2	9	12	19	22	29	32	39
Строка 1	1	10	11	20	21	30	31	40

<b>1</b>	Столб. 1	Столб. 2	Столб. 3	Столб. 4	Столб. 5	Столб. 6	Столб. 7	Столб. 8
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

в | с

Рисунок 1. Порядок высева (в) в контейнер (б) и раскладки на предметном стекле (б) прибора с зарядовой связью индивидуальных семян *P. sylvestris* var. *Negorelskaya*. Высев начального семени осуществляется в левую нижнюю ячейку контейнера по рисунку в (на рисунке а – правую верхнюю – перевернуто) и далее волнообразно продолжается в порядке, представленном на рисунке в; при сканировании разложенных согласно рисунку в семян получается зеркальное отображение (б), поэтому для фиксации стартового семени на предметное стекло помещают метку «St»

Figure 1. The order of sowing (c) in a container (a) and laying on a slide (b) of a device with a charge coupling of individual seeds of *P. sylvestris* var. *Negorelskaya*. Sowing of the initial seed is carried out in the lower left cell of the container according to figure b (in Figure a, the upper right cell is inverted) and then proceeds undularly in the order shown in figure b; when scanning seeds decomposed according to figure b, a mirror image is obtained (b), therefore, a label is placed on the slide to fix the starting seed "St".

Источник: собственная методика автора, позиция а приводится по рисунку 2б [10] (23.06.2023), повернутому против часовой стрелки на 90 градусов, позиция в приводится по рисунку 4а [10]

Source: author's own methodology, position a is shown in Figure 2b [8] (06/23/2023), rotated counterclockwise by 90 degrees, position c is shown in Figure 4a [8]

Выставляли контейнеры (в данном исследовании 30 штук) на пол теплицы с автоматизированным контролем температуры и влажности таким образом, чтобы исключить возможность пересушивания ризосферы будущих сеянцев.

Перемещали к постоянному месту полученный лесной посадочный материал с закрытой корневой системой в соответствующих контейнерах, поддерживая необходимую влажность и температуру.

Пересаживали с помощью меча Колесова на экспериментальную лесокультурную площадь произведенные из соответствующих индивидуальных семян индивидуальные контейнерные саженцы в порядке, соответствующем порядку их высева в контейнер.

Для введения дополнительного изучения фактора времени осуществлено создание лесных культур пересадкой сохранившихся в каждой из 40 ячеек контейнера растений *P. sylvestris* var. *Negorelskaya*: осенью 31 октября 2023 года (контейнеры 1-10), весной 29 марта 2024 года (контейнеры 11-20), а также будет осуществлена в конце октября 2024 года (контейнеры 21-29).

4) *Формирование информационных блоков технологического паспорта «семя – культура»*

Выполняли группу операций формирования для технологического паспорта «семя – культура» информационного блока параметров каждого индивидуального семени (гравиметрических, морфометрических и оптометрических, в том числе параметры RGB-яркости и цветности), включающую, но не ограничиваясь ими, следующие этапы: создание и депонирование в репозитории набора файловых данных (сканов соответствующей раскладки семян), индивидуальную сегментацию сканов семян с помощью специально разработанного Seed Individual Segmentator или типового программного обеспечения, идентификацию спектральных (качественных) данных индивидуального семени из сегментированного скана в одном из цветовых пространств, идентификацию геометрических (количественных) данных из сегментированного скана семени, создание и депонирование в репозитории набора табличных данных оптометрических ТП-параметров каждого индивидуального семени *P. sylvestris* L. var. *Negorelskaya*.

Выполняли группу операций формирования для технологического паспорта «семя – культура» блока показателей индивидуального лесного посадочного материала *P. sylvestris* L. var. *Negorelskaya*, полученного из соответствующего индивидуального семени. Формировали в соответствующий набор данных блока показатели контейнерной всхожести индивидуальных семян (на 30-й и 50-й дни). Формировали в соответствующий набор данных блока индекс Диксона – комплексный показатель качества контейнерных сеянцев (60-й день). Верифицировали и синхронизировали с целью формирования технологического паспорта «семя – культура» строки наборов данных показателей качества конкретного семени со строкой, соответствующей конкретному индивидуальному семени, наборов данных блока параметров семени.

Выполняли группу операций формирования для технологического паспорта «семя – культура» блока показателей индивидуального роста культур *P. sylvestris* L. var. *Negorelskaya*, полученных из соответствующего индивидуального семени. Формировали в соответствующий набор данных блока биометрические параметры роста индивидуальных культур *P. sylvestris* L. var. *Negorelskaya* в текущем вегетационном периоде, измеряемых в начале последующего вегетационного периода, возможно включающую, но не ограничиваясь ими, следующие этапы: создание и депонирование в репозитории набора файловых данных (фотоизображений индивидуальных культур в плане и профиле с применением координатной поверхности), измерение биометрических параметров (например диаметра корневой шейки с помощью цифрового штангенциркуля с точностью до 0,1 мм и высоты культуры с помощью металлической линейки с точностью до 1 мм), идентификация количественных / качественных данных из фотоизображения культуры, создание и депонирование в репозитории набора числовых / табличных данных биометрических параметров каждой индивидуальной культуры *P. sylvestris* L. var. *Negorelskaya*. Верифицировали и синхронизировали с целью формирования технологического паспорта «семя – культура» строки наборов числовых данных биометрических показателей конкретного растения со строками наборов данных информационного блока параметров семени.

В процессе онтогенеза культур на ювенильной стадии планируется на каждом вегетационном периоде дополнение технологического паспорта «семя – культура» файловыми данными изображения индивидуального саженца в профиле и плане, а также количественными биометрическими данными диаметра корневой шейки в мм, высоты в см.

*Анализ данных*

Для каждого индивидуального семени *P. sylvestris* L. var. *Negorelskaya*, участвующего в исследовании, (N = 1200), на основании набора данных вычисляли следующие оптометрические показатели в цветовом пространстве RGB:

– показатель средней яркости  $Ярк_{cp}$  изображения глубиной 8 бит индивидуального семени по формуле

$$Ярк_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n Ярк_{пик}}{Число_{пик}}, \quad (1)$$

где  $Ярк_{пик}$  – яркость каждого пикселя, в единицах яркости;  $Число_{пик}$  – количество пикселей в изображении;

– показатель насыщенности в относительных единицах, определяющий чистоту цвета в изображении индивидуального семени, по формуле

$$Насыщ(RGB) = 1 - (RGB_{max}/RGB_{min}). \quad (2)$$

На базе программного комплекса для обработки статистических данных SPSS Statistics, версия 25, осуществили одностороннюю ANOVA-

проверку, например, как у Новикова и Иветича (2018) [32], статистической гипотезы  $H_0$  в соответствии с рис. 2, что яркость и цветность внешней оболочки семени не различаются в группах с нулевой и ненулевой независимой переменной – всхожестью в контейнерах (30 и 50-дневной) при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ .

Для каждой зависимой переменной  $Ярк_{cp}$  и  $Насыщ(RGB)$  вычисляли показатели дескриптивных статистик, далее проверяли равенство дисперсий в группах с помощью статистики Ливиня, не требующей предположения о нормальности распределения. Если равенство дисперсий для вариантов зависимых переменных яркости и цветности оболочки семени по критерию Ливиня не соблюдалось, то применяли робастную статистику Уэлча.

Для уточнения различий между средними вариантами яркости и цветности в трех группах образцов по 400 семян, отобранных для исследования, применили апостериорные критерии в зависимости от равенства (или неравенства) дисперсий и визуализировали диаграммой межквартильного размаха с фильтром фактора всхожести. Для оценки степени детектирования семян в зависимости от нулевой и ненулевой всхожести по параметрам яркости и цветности изображения индивидуального семени строили точечную диаграмму с фильтром фактора всхожести.

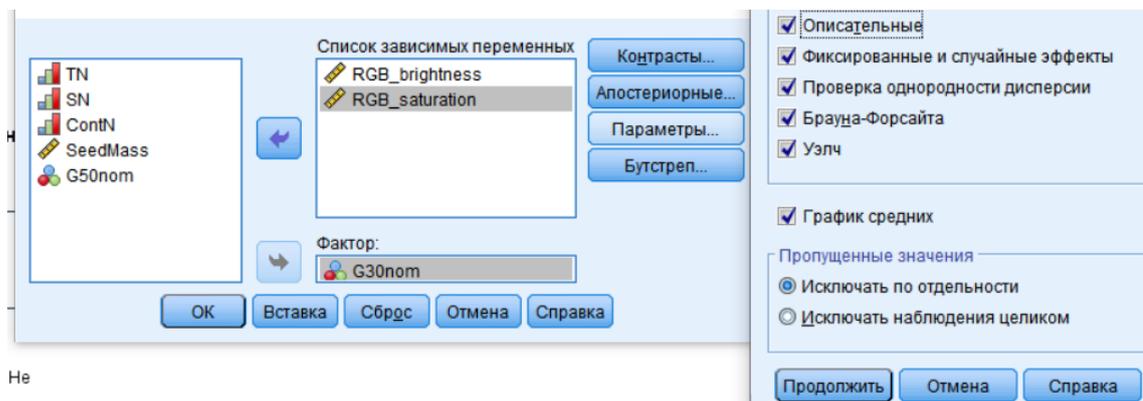


Рисунок 2. Скриншот параметризации процедуры однофакторного дисперсионного анализа для проверки статистической гипотезы равенства показателей яркости и насыщенности цвета внешней оболочки индивидуальных семян *P. sylvestris* L. var. *Negorelskaya*, используемых в технологическом паспорте «семя – культура»

Figure 2. Screenshot of parameterization of the procedure of one-factor analysis of variance to test the statistical hypothesis of equality of brightness and color saturation of the outer shell of individual seeds of *P. sylvestris* L. var. *Negorelskaya*, used in the technological passport of the "seed – culture"

Источник: собственные результаты автора | Source: own results

## Результаты

В табл. 1 рассчитаны описательные статистики параметров RGB-яркости и цветности для изображений индивидуальных семян в группах нулевой и ненулевой всхожести. В табл. 2 рассчитаны показатели однофакторного дисперсионного анализа параметров RGB-яркости и цветности для изображений индивидуальных семян между группами нулевой и ненулевой всхожести. В табл. 3 рассчитаны критерии однородности дисперсий Ливиня и равенства средних Уэлча зависимых переменных RGB-яркости и цветности для изображений индивидуальных семян между группами нулевой и ненулевой всхожести.

На рис. 3 представлен межквартильный размах и выбросы параметров RGB-яркости ( $a$ ,  $b$ ) и цветности ( $v$ ,  $z$ ) внешней оболочки трех образцов ( $N = 400$ ) индивидуальных семян сосны обыкновенной сорта Негорельская по гранту 23-26-00228 в группах нулевой и ненулевой всхожести на 30 ( $a$ ,  $v$ ) и 50-й дни ( $b$ ,  $z$ ). На рис. 4 представлено рассеяния параметров RGB-яркости и цветности внешней оболочки трех образцов ( $N = 400$ ) индивидуальных семян сосны обыкновенной сорта Негорельская по гранту 23-26-00228 в группах нулевой и ненулевой всхожести на 30 и 50-й дни

Анализируя табл. 1-3 и интерпретируя, по Н.А. Цейтлину (2006)<sup>1</sup>, осуществляя «процесс толкования численных результатов расчета в терминах предметной области (с. 52)», в данном случае технологии детектирования лесных семян, отметим:

1. Наилучшей мерой центральной тенденции показателя средней яркости для изображений всех семян ( $N = 1200$ ) представляется медиана – 76 единиц яркости, ниже которой лежит ровно половина, то есть 600 значений средней яркости, при этом 43 изображения индивидуальных семян имеют среднюю яркость 71 (3,6 % всего количества). Средняя статистика составляет 82 единицы яркости.

2. Наилучшей мерой центральной тенденции показателя насыщенности цвета для изображений всех семян ( $N = 1200$ ) представляется медиана – 0,172 относительных единицы, ниже которой лежит

ровно половина, то есть 600 значений насыщенности цвета, при этом 12 изображений индивидуальных семян имеют среднюю яркость 0,145 (1 % всего количества). Средняя статистика составляет 0,189 относительных единиц.

3. Базовая мера индивидуальной изменчивости показателя яркости  $Ярк_{ср}$  может быть описана отношением суммы квадратов отклонений от средней статистики к числу изображений всех семян ( $N = 1200$ ), равным 443, или величиной, равной по размерности со средней статистикой, а именно квадратным корнем  $\sim 21$ . При этом размах составляет 115 единиц яркости ( $\max 115$  минус  $\min 40$ ), а межквартильный размах ( $IQR = Q3 - Q1$ ), внутри которого сосредоточены 50 % рассчитанных значений ( $N = 600$ ), составляет 27 единиц яркости. В качестве дополнительных мер изменчивости использован коэффициент вариации ( $SD21/Mean82 = 0,256 \sim 25\%$ ), характеризующийся, по Станиславу Александровичу Мамаеву (1973) [5], средним уровнем (16-25 %) индивидуальной (с. 19) изменчивости признака яркости  $Ярк_{ср}$ .

4. Базовая мера индивидуальной изменчивости показателя насыщенности цвета  $Насыщ(RGB)$  может быть описана отношением суммы квадратов отклонений от средней статистики к числу изображений всех семян ( $N = 1200$ ), равным 0,011, или величиной, равной по размерности со средней статистикой, а именно квадратным корнем  $\sim 0,107$ . При этом размах составляет 0,513 относительных единиц ( $\max 0,513$  минус  $\min 0,000$ ), а межквартильный размах ( $IQR = Q3 - Q1$ ), внутри которого сосредоточены 50 % рассчитанных значений ( $N = 600$ ), составляет 0,174 относительных единиц. В качестве дополнительных мер изменчивости использован коэффициент вариации ( $SD0,107/Mean0,189 = 0,566 \sim 57\%$ ), характеризующийся, по С.А. Мамаеву (1973) [5], очень высоким (более 50 %) уровнем индивидуальной изменчивости признака насыщенности цвета  $Насыщ(RGB)$ .

<sup>1</sup>Цейтлин, Н.А. Из опыта аналитического статистика / Н.А. Цейтлин. – М. : МЗ Пресс, 2006. – 908 с.

Таблица 1

Описательные статистики параметров RGB-яркости и цветности для изображений индивидуальных семян в группах нулевой и ненулевой всхожести

Table 1

Descriptive statistics of RGB brightness and RGB saturation parameters for individual seed images in groups of zero and non-zero germination

Оптометрический параметр индивидуального изображения семени   RGB-feature	Всхожесть   Germination	Количество   Quantity	Среднее   Mean	Стандартное отклонение   SD	Стандартная ошибка   SE	95% доверительный интервал для среднего значения   95% confidence interval for the mean value		Минимум   Minimum	Максимум   Maximum
						Нижняя граница   Lower bound	Верхняя граница   Upper bound		
<b>По показателю всхожести в контейнерах на 30 день   G30 germination</b>									
Средняя яркость   RGB_brightness	Не взошло	258	96	25	1,5	93	99	52	155
	Взошло	942	78	18	0,6	77	80	40	147
	Всего	1200	82	21	0,6	81	83	40	155
Насыщенность цвета   RGB_saturation	Не взошло	258	0,235	0,103	0,006	0,222	0,247	0,017	0,461
	Взошло	942	0,177	0,104	0,003	0,169	0,183	0,000	0,513
	Всего	1200	0,189	0,107	0,003	0,182	0,195	0,000	0,513
<b>По показателю всхожести в контейнерах на 50 день   G50 germination</b>									
Средняя яркость   RGB_brightness	Не взошло	243	87	23	1,5	84	90	49	147
	Взошло	877	81	20	0,7	80	82	40	154
	Всего	1120*	82	21	0,6	81	83	40	154
Насыщенность цвета   RGB_saturation	Не взошло	243	0,195	0,111	0,007	0,181	0,209	0,014	0,513
	Взошло	877	0,187	0,105	0,004	0,180	0,194	0,000	0,474
	Всего	1120*	0,189	0,106	0,003	0,182	0,195	0,000	0,513

Примечание: \* два контейнера с сеянцами использовали для оценки индекса качества Диксона

Источник: собственные результаты авторов

Source: own results

Таблица 2

Показатели однофакторного дисперсионного анализа параметров RGB-яркости и цветности для изображений индивидуальных семян между группами нулевой и ненулевой всхожести

Table 2

Indicators of single-factor dispersion analysis of RGB brightness and chromaticity parameters for images of individual seeds between groups of zero and non-zero germination

Оптометрический параметр индивидуального изображения семени   RGB-feature	Сумма квадратов   SS	Степень свободы   df	Средний квадрат   MS	F	Значимость   p
<b>По показателю всхожести в контейнерах на 30 день   G30 germination</b>					
Средняя яркость   RGB brightness	64761,604	1	64761,604	166,170	1,0631E-35
Насыщенность цвета   RGB saturation	0,683	1	0,683	63,015	4,6857E-15
<b>По показателю всхожести в контейнерах на 50 день   G50 germination</b>					
Средняя яркость   RGB brightness	6559,445	1	6559,445	15,385	0,000093
Насыщенность цвета   RGB saturation	0,012	1	0,012	1,094	<b>0,296</b>

Источник: собственные результаты авторов

Source: own results

Таблица 3

Критерии однородности дисперсий Ливиния и равенства средних Уэлча вариант RGB-яркости и цветности для изображений индивидуальных семян между группами нулевой и ненулевой всхожести

Table 3

Criteria for uniformity of dispersions and equality of averages RGB brightness and chromaticity option for images of individual seeds between groups of zero and non-zero germination

Оптометрический параметр индивидуального изображения семени   RGB-feature	Степень свободы 1   df1	Степень свободы 2 Ливиния / Уэлча   df2 for Leaven / Welch	Статистика Ливиния   Leaven Statistics	Статистика Уэлча   Welch Statistics	Значимость Ливиния / Уэлча   p for Leaven   Welch
<b>По показателю всхожести в контейнерах на 30 день   G30 germination</b>					
Средняя яркость   RGB brightness	1	1198 / 335,079	81,829	116,592	5,8382E-19 / 1,5986E-23
Насыщенность цвета   RGB saturation	1	1198 / 413,436	0,000023	64,080	<b>0,996154</b> / – (см. F-тест)
<b>По показателю всхожести в контейнерах на 50 день   G50 germination</b>					
Средняя яркость   RGB brightness	1	1118 / 351,724	13,305	13,266	0,000277 / 0,000311
Насыщенность цвета   RGB saturation	1	1118 / 369,848	3,737	1,024	<b>0,053460</b> / – (см. F-тест)

Источник: собственные результаты авторов

Source: own results

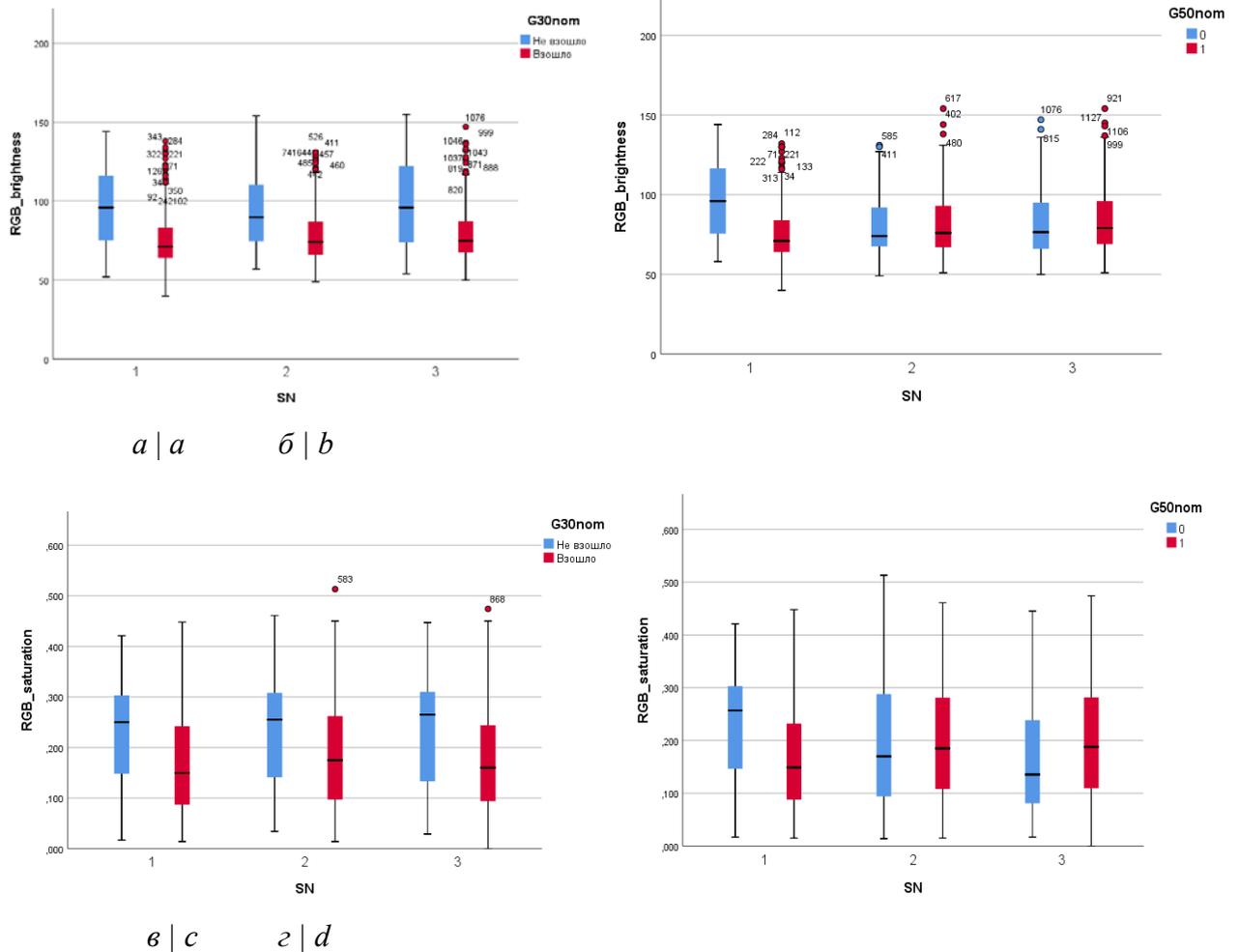


Рисунок 3. Межквартильный размах и выбросы параметров RGB-яркости (*a*, *b*) и цветности (*c*, *d*) внешней оболочки трех образцов ( $N = 400$ ) индивидуальных семян сосны обыкновенной сорта Негорельская по гранту 23-26-00228 в группах нулевой и ненулевой всхожести на 30 (*a*, *c*) и 50-й дни (*b*, *d*). SN – номер образца индивидуальных семян, используемых в исследовании.

Figure 3. Interquartile range and emissions of RGB brightness (*a*, *b*) and chromaticity (*c*, *d*) parameters of the outer shell of three samples ( $N = 400$ ) of individual seeds of Scots pine variety Negorelskaya under grant 23-26-00228 in groups of zero and non-zero germination on days 30 (*a*, *c*) and 50 (*b*, *d*).

Источник: собственные результаты авторов

Source: own results

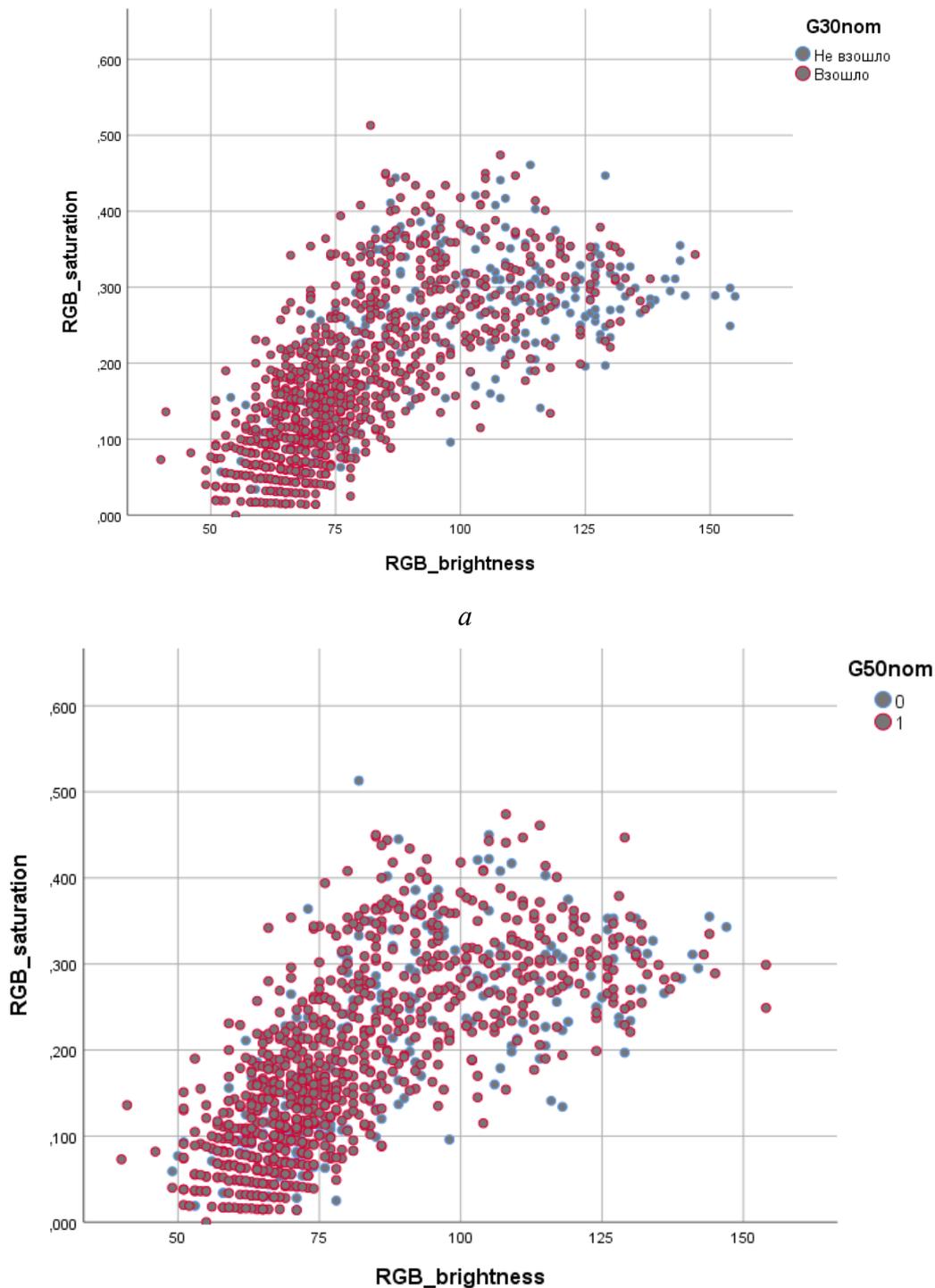


Рисунок 4. Диаграмма рассеяния параметров RGB-яркости и цветности внешней оболочки индивидуальных семян ( $N = 1200$ ) сосны обыкновенной сорта Негорельская по гранту 23-26-00228 в группах нулевой и ненулевой всхожести на 30 (а) и 50-й (б) дни

Figure 4. Scatter plot of the RGB brightness and RGB saturation parameters of the outer shell of individual seeds ( $N = 1200$ ) of Scots pine variety Negorelskaya under grant 23-26-00228 in groups of zero and non-zero germination on days 30 and 50

Источник: собственные результаты авторов

Source: own results

5. Меры отклонения формы распределения показателя яркости  $Ярк_{ср}$  для всех семян ( $N = 1200$ ) представлены мерой сглаженности  $E = 0,270$ , а также мерой асимметрии  $A = 0,952$ , указывающих на умеренную «островершинность», сильно смещенную в сторону меньших значений  $Ярк_{ср}$ , предварительно нормально ( $-1 < A < +1$ ) распределенных.

6. Меры отклонения формы распределения показателя насыщенности цвета  $Насыщ(RGB)$  для всех семян ( $N = 1200$ ) представлены мерой сглаженности  $E = -0,806$ , а также мерой асимметрии  $A = 0,370$ , указывающих на сильную «плосковершинность», несколько смещенную в сторону меньших значений  $Насыщ(RGB)$ , предварительно нормально ( $-1 < A < +1$ ) распределенных.

7. В группах нулевой ( $N = 258$ ) и ненулевой ( $N = 942$ ) всхожести индивидуальных семян сосны обыкновенной сорта «Негорельская» в контейнерах на 30-й день гипотеза о гомогенности дисперсий для показателя яркости  $Ярк_{ср}$  изображений индивидуальных семян отвергается (статистика Ливиня 81,829 при  $p = 5,8382E-19$ ) и для проверки гипотезы о равенстве средних статистик будет использован тест Уэлча (W-тест). Для показателя насыщенности цвета  $Насыщ(RGB)$  гипотеза о гомогенности дисперсий не отвергается (статистика Ливиня 0,000023 при  $p = 0,996154$ ) – будет использован F-тест. Аналогично при сравнении средних значений в группах нулевой и ненулевой всхожести на 50-й день для показателя яркости  $Ярк_{ср}$  будет использован W-тест (статистика Ливиня 13,305 при  $p = 0,000277$ ), для показателя насыщенности цвета  $Насыщ(RGB)$  – F-тест (статистика Ливиня 3,737 при  $p = 0,053460$ ).

8. Поскольку значения критерия  $W = 116,592$  (дихотомические группы 30-дневной всхожести) и  $W = 13,266$  (дихотомические группы 50-дневной всхожести) имеют уровни достоверности  $p = 1,5986E-23$  и  $p = 0,000311$  соответственно, то гипотеза  $H_0$  отвергается и можно говорить, что наблюдаемые различия между показателями яркости  $Ярк_{ср}$  внешней оболочки невзошедших семян и семян, давших нормальные всходы, неслучайны.

9. Поскольку значение критерия  $F = 63,015$  (дихотомические группы 30-дневной всхожести) имеет уровень достоверности  $p = 4,6857E-15$ , то гипотеза  $H_0$  отвергается и можно говорить, что наблюдаемые различия между показателями насыщенности цвета  $Насыщ(RGB)$  внешней оболочки невзошедших семян и семян, давших нормальные всходы, не случайны. Напротив, значение критерия  $F = 1,094$  (дихотомические группы 50-дневной всхожести) имеет  $p = 0,296$ , что значительно выше фиксированного уровня значимости 0,05 и не дает оснований для убедительных статистических доказательств, что  $H_0$  может быть отвергнута.

#### Обсуждение

Использование RGB-параметров в качестве неразрушающего маркера для решения экспериментальной задачи идентификации различных подгрупп семян с различным качеством прорастания и различным распределением семян с целью изучения физиологических различий между ними может привести к лучшему пониманию физиологической основы всхожести семян, как это показано у Антонио дел'Аквила (2006)<sup>1</sup> на примере старения семян *Lens culinaris* Medik., у Ювала Нехоштана и соавторов (2021) [27] на примере кластеризации невзошедших семян 29 сортов сельскохозяйственных культур, у Эрики Беатрис де Лима Кастро и соавторов (2022) [22] на примере детектирования генотипа семян *Phaseolus lunatus* L. по двумерным изображениям.

Средний уровень (16-25 %) изменчивости признака яркости внешней оболочки семян сосны обыкновенной сорта «Негорельская», участвующих в исследовании, в большей степени характерен, по данным А.И. Новикова (2019) [6], для уровня изменчивости признака высоты культур сосны обыкновенной, произведенных из оптически сепарированных семян, в конце первого вегетационного периода, и в меньшей степени характерен для низкого уровня (7-15%) изменчивости признаков длины, ширины и толщины и повышенного уровня (26-35 %) изменчивости признака массы тех же семян, отраженного в Трудах БГТУ... С.В. Ребко и соавторами

<sup>1</sup>Dell'Aquila, A. Red-Green-Blue (RGB) colour density as a non-destructive marker in sorting deteriorated lentil (*Lens culinaris* Medik.)

seeds / A. Dell'Aquila // Seed Science and Technology. – 2006. – Vol. 34. – № 3. – P. 609-619. – DOI: <https://doi.org/10.15258/sst.2006.34.3.08>.

(2024) [20]. Изменчивость признака насыщенности цвета *Насыщ(RGB)* для изображений семян не характерна ни для одного из морфометрических признаков исследуемого сорта *P. sylvestris* L. var. *Negorelskaya*, что требует дополнительных исследований.

В будущем наборы данных, формирующие технологический паспорт «семя – культура» сосны обыкновенной сорта «Негорельская», могут стать основой стандарта классификации качества семян, саженцев, например, с помощью SQCSEF-кластеризации по Цзин Яньчжи и др. (2024) [26] или ABC-XYZ-кластеризации по С.А. Евдокимовой (2021) [23]. В свою очередь, внедрение стандарта классификации качества с учетом свойств семян позволит снизить риски при производстве как лесосеменного, так и лесопосадочного материала с закрытой и открытой корневыми системами, будет способствовать улучшению сортов, упростит механизм и повысит экономические выгоды международной торговли для устойчивого развития лесного хозяйства.

При этом для дальнейшего заполнения технологического паспорта «семя – культура» и прогнозирования эффективности восстановления лесного ландшафта после пересадки культуры на постоянное место необходимо будет учесть, как полагают исследователи продуктивности в проектах облесения во Фландрии Крис Верхейен с соавторами (2024, Гентский университет, Бельгия), «взаимодействия между характеристиками высаженных культур, такими как качество корневой системы...[51]» или другими индексами качества у А.И. Новикова и др. (2023) [35], и «...физическими, химическими и биологическими характеристиками почвы на участке [51]». Данное мнение достаточно хорошо согласуется с мнением Т.П. Новиковой и соавторов (2014), разрабатывающих справочную информационную систему FLR-Library [37] для адаптивного восстановления лесных ландшафтов, Алехандро А. Ройо и соавторов (2014), разрабатывающих информационную платформу DREAM (Desired REgeneration

through Assisted Migration) [44], о необходимости «определения и учета свойств почвы через входные переменные для алгоритма управления процессом лесовосстановления, так как выбор машин и оборудования должен базироваться не только на производительности, но и учитывать исходные данные по почвенным характеристикам для оптимального роста и развития древесных пород [15]».

### Заключение

Преимуществами методики формирования технологического паспорта «семя – культура (*Pinus sylvestris* L., var. *Negorelskaya*)» являются простота реализации, не требующая дорогостоящего оборудования, удобный механизм синхронизации данных и возможность объединения наборов данных на уровне информационной системы (например, интеграции в справочную информационную систему – СИС FLR-Library авторской разработки [37; 40]) для поддержки принятия решений по интенсификации процесса лесовыращивания культур *Pinus sylvestris* L., var. *Negorelskaya* при восстановлении лесных ландшафтов.

Средняя статистика показателя RGB-яркости  $Ярк_{cp}$  (M | 78; SD | 18) внешней оболочки семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L. var. *Negorelskaya*) в группе ненулевой (N = 942) всхожести значимо (критерий однородности дисперсий Ливиня 81,829; p = 5,8382e-19; ANOVA W-критерий (Уэлча) 116,592; p = 1,5986e-23) отличаются от средней статистики показателя (M | 96; SD | 25) в группе нулевой (N = 258) всхожести.

Средняя статистика показателя RGB-цветности *Насыщ(RGB)* (M | 0,177; SD | 0,104) внешней оболочки семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L. var. *Negorelskaya*) в группе ненулевой всхожести значимо (критерий однородности дисперсий Ливиня 0,000023; p = 0,996154; ANOVA F-критерий 63,015; p = 4,6857e-15) отличаются от средней статистики показателя (M | 0,235; SD | 0,103) в группе нулевой всхожести.

## Список литературы

1. Экспресс-анализатор качества семян: пат. 2675056 Российская Федерация, МПК7 В 07 С 5/00 / А.У. Альбеков, М.В. Драпалюк, С.С. Морковина и др. – Заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. лесотехн. ун-т. – № 2018104941 ; заявл. 08.02.2018 ; опубл. 14.12.2018, Бюл. № 35., .
2. Разработка комплексного параметрического паспорта зерновки для выявления партий хозяйственно ценных семян и зерна с минимальным уровнем скрытой поврежденности для отбора в индустриальном зернопроизводстве / М.В. Архипов, Ю.А. Тюкалов, Т.А. Данилова и др. // Современное состояние, проблемы и перспективы развития аграрной науки : Материалы VIII международной научно-практической конференции. – Симферополь, 2023. – С. 36-37. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/jwtrky>.
3. Экспресс-анализатор качества семян: пат. 040058 ЕАРО, МПК В 07 С 5/34 / М.В. Драпалюк, С.С. Морковина, А.И. Новиков и др. – 2022. – Режим доступа: <https://www.eapo.org/ru/patents/reestr/patent.php?id=40058>.
4. Драпалюк, М.В. Анализ операционных механизированных технологий сепарации семян при искусственном лесовосстановлении / М.В. Драпалюк, А.И. Новиков // Лесотехнический журнал. – 2018. – Т. 8. – № 4. – С. 207-220. – DOI: [https://doi.org/10.12737/article\\_5c1a3237290288.22345283](https://doi.org/10.12737/article_5c1a3237290288.22345283). – Режим доступа: <https://elibrary.ru/akvbnm>.
5. Мамаев, С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений (на примере семейства Pinaceae на Урале) / С.А. Мамаев. – М. : Наука, 1973. – 284 с. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/vwvadh>.
6. Новиков, А.И. Некоторые результаты апробации технологии сепарации по количественному признаку семян сосны обыкновенной / А.И. Новиков // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2019. – Т. 227. – С. 68-87. – DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2019.227.68-87>. – Режим доступа: <http://spbftu.ru/wp-content/uploads/2019/09/227-06.pdf>.
7. Новиков, А.И. Совершенствование технологии получения высококачественного лесосеменного материала : специальность 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А.И. Новиков. – Воронеж, 2021. – 32 с. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/qgemiu>.
8. Новиков, А.И. Экспресс-анализ лесных семян биофизическими методами / А.И. Новиков. – Воронеж, 2018. – 128 с. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/yzuzgx>.
9. Экспресс-анализ семян в лесохозяйственном производстве: теоретические и технологические аспекты / А.И. Новиков, М.В. Драпалюк, С.В. Соколов, Т.П. Новикова. – Воронеж, 2022. – 176 с. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/hmrfvd>.
10. Влияние индивидуальной массы семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) сорта «Негорельская» на 30-дневное прорастание в 40-ячеистых SideSlit-контейнерах / А.И. Новиков, С.В. Ребко, Т.П. Новикова, Е.П. Петрищев // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 2 (50). – С. 59-86. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/4>. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/cewtjt>.
11. Индекс качества Диксона: связь с технологическим воздействием на лесные семена / А.И. Новиков, С.В. Ребко, Т.П. Новикова, Е.П. Петрищев // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 1. – С. 23-36. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/2>. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/nsvcyi>.
12. Исследование спектрометрических показателей семян как основа интенсификации процесса лесовыращивания культур сосны обыкновенной сорта «Негорельская» : грант РНФ 23-26-00228 / А.И. Новиков, С.В. Ребко, Т.П. Новикова, Е.П. Петрищев. – М. : Российский научный фонд, 2023. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/jtyxuh>.
13. Новиков, А.И. Исследование спектрометрических параметров семенной кожуры сосны обыкновенной в ИК-диапазоне / А.И. Новиков, В.В. Саушкин // Лесотехнический журнал. – 2018. – Т. 8. – № 3. – С. 30-37. – DOI: [https://doi.org/10.12737/article\\_5b97a164e41782.20107217](https://doi.org/10.12737/article_5b97a164e41782.20107217). – Режим доступа: <https://elibrary.ru/votakr>.

14. Новикова, Т.П. Анализ терминологии стран мира, осуществляющих активную лесохозяйственную деятельность в области исследования спектрометрических свойств лесных семян: свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023624886 Российская Федерация / Т.П. Новикова, А.И. Новиков, Е.П. Петрищев. – № 2023624495 ; заявл. 02.12.2023 ; зарег. 22.12.2023, . – Режим доступа: <https://elibrary.ru/ljghq>.
15. Новикова, Т.П. Влияние физико-механических свойств почвы на процесс адаптивного лесовосстановления / Т.П. Новикова, Е.П. Петрищев, А.И. Новиков // Лесное хозяйство : Материалы 88-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием). – Минск : Белорусский государственный технологический университет, 2024. – С. 291-294. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/jaikmm>.
16. Петрищев, Е.П. Результаты исследований посевных качеств семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L., сорт Негорельская) и определения индекса качества Диксона 60-дневных сеянцев в контейнерном питомнике: свидетельство о государственной регистрации базы данных № 20236 / Е.П. Петрищев, Т.П. Новикова, А.И. Новиков. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/gwhapl>.
17. Результаты морфометрических исследований семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L., сорт Негорельская): свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023624679 Российская Федерация / Е.П. Петрищев, Т.П. Новикова, С.В. Ребко, А.И. Новиков. – № 2023624380 : заявл. 01.12.2023 : опубл. 18.12.2023, . – Режим доступа: <https://elibrary.ru/dyexbk>.
18. Поплавская, Л.Ф. Результаты районирования сосны обыкновенной сорта Негорельская в Республике Беларусь / Л.Ф. Поплавская, С.В. Ребко, П.В. Тупик // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2021. – Т. 1. – № 240. – С. 58-67. – DOI: <https://doi.org/10.52065/2519-402x-2021-240-7-58-67>. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/sxivbp>.
19. Прияткин, Н.С. Неинвазивная экспресс-оценка разнокачественности и хозяйственной пригодности семенного материала на основе использования инструментальных физических методов: дисс. ... д-ра биол. наук: 4.1.5 / Н.С. Прияткин. – Санкт-Петербург : АФИ, 2023. – 253 с. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/aseotz>.
20. Взаимосвязи между геометрическими и гравиметрическими параметрами семян сосны обыкновенной / С.В. Ребко, А.И. Новиков, Т.П. Новикова, Е.П. Петрищев // Труды БГТУ. Серия 1 - Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2024. – Т. 276. – С. 66-76. – DOI: <https://doi.org/10.52065/2519-402X-2024-276-8>. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/ltgvsz>.
21. Deep-Learning Approach for Fusarium Head Blight Detection in Wheat Seeds Using Low-Cost Imaging Technology / R.C. Bernardes, A. De Medeiros, L. da Silva et al. // Agriculture. – 2022. – Vol. 12. – № 11. – P. 1801. – DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12111801>.
22. Classification of Phaseolus lunatus L. using image analysis and machine learning models / É.B. de L. Castro, R. de S. Melo, E.M. da Costa et al. // Revista Caatinga. – 2022. – Vol. 35. – № 4. – P. 772-782. – DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-21252022v35n404rc>.
23. Evdokimova, S.A. Segmentation of store customers to increase sales using ABC-XYZ-analysis and clustering methods / S.A. Evdokimova // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2032. – № 1. – P. 012117. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2032/1/012117>.
24. Landscape-Scale Mixtures of Tree Species are More Effective than Stand-Scale Mixtures for Biodiversity of Vascular Plants, Bryophytes and Lichens / S. Heinrichs, C. Ammer, M. Mund et al. // Forests. – 2019. – Vol. 10. – № 1. – P. 73. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f10010073>.
25. Ivetić, V. The role of forest reproductive material quality in forest restoration / V. Ivetić, A.I. Novikov // Forestry Engineering Journal. – 2019. – Vol. 9. – № 2. – P. 56-65. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.2/7>.
26. Jing, Y. Establish seedling quality classification standard for Chrysanthemum efficiently with help of deep clustering algorithm / Y. Jing, H. Zhao, S. Yu // ArXiv. – 2024. – P. 1-12. – DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.08867>.

27. Robust seed germination prediction using deep learning and RGB image data / Y. Nehoshtan, E. Carmon, O. Yaniv et al. // *Scientific Reports*. – 2021. – Vol. 11. – № 1. – P. 22030. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01712-6>.
28. X-ray analysis of seed quality of *Eucommia ulmoides* Oliv. of different geographical origin / Q.T. Nguyen, S.G. Sakharova, N.S. Priyatkin, A.V. Zhigunov // *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhniceskoj akademii*. – 2021. – № 234. – P. 134-151. – DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2021.234.134-151>.
29. Novikov, A.I. Visible wave spectrometric features of Scots pine seeds: the basis for designing a rapid analyzer / A.I. Novikov // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 226. – № 1. – P. 012064. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012064>.
30. Mechanization of coniferous seeds grading in Russia: a selected literature analysis / A.I. Novikov, B.T. Ersson, V.V. Malyshev et al. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2020. – Vol. 595. – P. 012060. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/595/1/012060>.
31. Novikov, A.I. The effect of seed coat color grading on height of one-year-old container-grown Scots pine seedlings planted on post-fire site / A.I. Novikov, V. Ivetić // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 226. – P. 012043. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012043>.
32. Novikov, A.I. The effect of seed size grading on seed use efficiency and height of one-year-old container-grown Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings / A.I. Novikov, V. Ivetić // *Reforesta*. – 2018. – Vol. 6. – P. 100-109. – DOI: <https://doi.org/10.21750/REFOR.6.08.61>.
33. Scots pine seedlings growth dynamics data reveals properties for the future proof of seed coat color grading conjecture / A.I. Novikov, V. Ivetić, T.P. Novikova, E.P. Petrishchev // *Data*. – 2019. – Vol. 4. – № 3. – P. 106. – DOI: <https://doi.org/10.3390/data4030106>.
34. Novikov, A.I. Non-destructive quality control of forest seeds in globalization: problems and prospects of output innovative products / A.I. Novikov, T.P. Novikova // *Globalization and Its Socio-Economic Consequences* / T. Kliestik ed. – Rajecke Teplice, Slovakia : Univ Zilina, 2018. – P. 1260-1267.
35. Dickson Quality Index: relation to technological impact on forest seeds / A.I. Novikov, S. Rabko, T.P. Novikova, E.P. Petrishchev // *Forestry Engineering Journal*. – 2023. – Vol. 13. – № 1. – P. 23-36. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/2>.
36. Performance of Scots pine seedlings from seeds graded by colour / A.I. Novikov, S.V. Sokolov, M.V. Drapalyuk et al. // *Forests*. – 2019. – Vol. 10. – № 12. – P. 1064. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f10121064>.
37. FLR-Library reference information system for adaptive forest restoration: the information model / T. Novikova, A. Novikov, V. Lisitsyn, E. Petrishchev // *Forestry Engineering Journal*. – 2023. – Vol. 13. – № 4. – P. 114-124. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/7>.
38. Novikova, T. Studying the spectrometric features of forest seeds to improve sowing qualities: a retrospective cluster analysis of the scientific landscape trends / T. Novikova, A. Novikov, E. Petrishchev // *Forestry Engineering Journal*. – 2023. – Vol. 13. – № 4. – P. 23-39. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/1>.
39. Novikova, T.P. The choice of a set of operations for forest landscape restoration technology / T.P. Novikova // *Inventions*. – 2022. – Vol. 7. – № 1. – P. 1. – DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions7010001>.
40. Novikova, T.P. FLR-Library reference information system for adaptive forest restoration: cluster analysis of descriptors / T.P. Novikova, A.I. Novikov, E.P. Petrishchev // *Forestry Engineering Journal*. – 2023. – Vol. 13. – № 3. – P. 164-179. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/12>.
41. Novikova, T.P. Reforestation pipeline: case for quality management of NIR-region grading of Scots pine seeds and FLR-algorithm for information processing / T.P. Novikova, E.P. Petrishchev, A.I. Novikov // *Silva Balcanica*. – 2023. – Vol. 24. – № 3. – P. 5-16. – DOI: <https://doi.org/10.3897/silvabalcanica.24.e114699>.
42. Novikova, T.P. The VIS-spectrometric data of Scots pine individual seed reveal forecasting potential for container-grown germination and seedling's Dickson quality index / T.P. Novikova, E.P. Petrishchev, A.I. Novikov // *Preprints*. – 2023. – № 1. – DOI: <https://doi.org/10.20944/preprints202312.0561.v1>.

43. The Root Collar Diameter Growth Reveals a Strong Relationship with the Height Growth of Juvenile Scots Pine Trees from Seeds Differentiated by Spectrometric Feature / T.P. Novikova, P. Tylek, C.B. Mastrangelo et al. // *Forests*. – 2023. – Vol. 14. – № 6. – P. 1164. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f14061164>.
44. Desired REgeneration through Assisted Migration (DREAM): Implementing a research framework for climate-adaptive silviculture / A.A. Royo, P. Raymond, C.C. Kern et al. // *Forest Ecology and Management*. – 2023. – Vol. 546. – № October. – P. 121298. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121298>.
45. Dynamics of biodiversity of nectar-bearing resources in the structure of birch forests / I. Samsonova, V. Do, T. Nguen, P. Sidarenko Petr // *Forestry Engineering Journal*. – 2020. – Vol. 9. – № 4. – P. 73-81. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.4/8>.
46. Study of biodiversity and assessment of the state of common hazel (*Corylus avellana* L.) in the Voronezh region / V. Slavskiy, T. Nakonechnaya, E. Titov, Z. Govedar // *Forestry Engineering Journal*. – 2022. – Vol. 12. – № 3. – P. 51-61. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.3/5>.
47. How to increase the analog-to-digital converter speed in optoelectronic systems of the seed quality rapid analyzer / S. V. Sokolov, V. V. Kamenskij, A.I. Novikov, V. Ivetić // *Inventions*. – 2019. – Vol. 4. – № 4. – P. 61. – DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions4040061>.
48. Sokolov, S.V. New optoelectronic systems for express analysis of seeds in forestry production / S.V. Sokolov, A.I. Novikov // *Forestry Engineering Journal*. – 2019. – Vol. 9. – № 2. – P. 5-13. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.2/1>.
49. Advances in forest restoration management and technology / J.A. Stanturf, R.K. Dumroese, S. Elliott et al. – New York, NY : Oxford University Press, 2024. – 297-334 p.
50. Adaptive silviculture for climate change in the Great Lakes- St. Lawrence Forest Region of Canada: Background and design of a long-term experiment / N. Thiffault, J. Fera, M.K. Hoepting et al. // *The Forestry Chronicle*. – 2024. – Vol. 100. – № 2. – P. 155-164. – DOI: <https://doi.org/10.5558/tfc2024-016>.
51. Verheyen, K. Soil physical characteristics predict sapling performance in recent afforestation projects in Flanders (northern Belgium) subjected to drought / K. Verheyen, K. Haegeman, W. Cornelis // *Forest Ecology and Management*. – 2024. – Vol. 572. – P. 122304. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122304>.

### References

1. Express seed quality analyzer: pat. 2675056 Russian Federation, MPK7 At 07 From 5/00 / A.U. Albekov, M.V. Drapalyuk, S.S. Morkovina [et al.] - applicant and patent holder Voronezh State Forestry Engineering. un-T. – No. 2018104941 ; application 08.02.2018 ; publ. 14.12.2018, Issue No. 35.
2. Development of a complex parametric passport of grain for the identification of batches of economically valuable seeds and grains with a minimum level of latent damage for selection in industrial grain production / M.V. Arkhipov, Yu.A. Tyukalov, T.A. Danilova, etc. // Current state, problems and prospects of agricultural science development : Proceedings of the VIII International Scientific and Practical conference. – Simferopol, 2023. – pp. 36-37. – URL: <https://elibrary.ru/jwtrky>.
3. Express seed quality analyzer: pat. 040058 EAPO, IPC B 07 C 5/34 / M.V. Drapalyuk, S.S. Morkovina, A.I. Novikov et al. – 2022. – URL: <https://www.eapo.org/ru/patents/reestr/patent.php?id=40058>.
4. Drapalyuk, M.V. Analysis of operational mechanized technologies of seed separation in artificial reforestation / M.V. Drapalyuk, A.I. Novikov // *Forestry Journal*. – 2018. – Vol. 8. – No. 4. – pp. 207-220. – DOI: [https://doi.org/10.12737/article\\_5c1a3237290288.22345283](https://doi.org/10.12737/article_5c1a3237290288.22345283). – URL: <https://elibrary.ru/akvbnm>.
5. Mamaev, S.A. Forms of intraspecific variability of woody plants (on the example of the Pinaceae family in the Urals) / S.A. Mamaev. – M. : Nauka, 1973. – 284 p. – URL: <https://www.elibrary.ru/vwvadh>.
6. Novikov, A.I. Some results of approbation of separation technology based on the quantitative characteristic of scots pine seeds / A.I. Novikov // *Izvestiya St. Petersburg Forestry Academy*. - 2019. – Vol. 227. – pp. 68-87. – DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2019.227.68-87>.

7. Novikov, A.I. Improvement of technology for obtaining high-quality forest seed material : specialty 05.21.01 "Technology and machines of logging and forestry" : abstract of the dissertation of the Doctor of Technical Sciences / A.I. Novikov. – Voronezh, 2021. – 32 p. – URL: <https://elibrary.ru/qgemiu>.
8. Novikov, A.I. Express analysis of forest seeds by biophysical methods / A.I. Novikov. – Voronezh, 2018. – 128 p. – URL: <https://elibrary.ru/yzuzgx>.
9. Express analysis of seeds in forestry production: theoretical and technological aspects / A.I. Novikov, M.V. Drapalyuk, S.V. Sokolov, T.P. Novikova. – Voronezh, 2022. – 176 p. – URL: <https://elibrary.ru/hmrfvd>.
10. The effect of the individual seed weight of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) of the Negorelskaya variety on 30-day germination in 40-cell SideSlit containers / A.I. Novikov, S.V. Rebko, T.P. Novikova, E.P. Petrishchev // Forestry Journal. – 2023. – Vol. 13. – № 2 (50). – Pp. 59-86. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/4>. – URL: <https://elibrary.ru/cewtjt>.
11. Dixon quality index: connection with technological impact on forest seeds / A.I. Novikov, S.V. Rebko, T.P. Novikova, E.P. Petrishchev // Forestry Journal. – 2023. – vol. 13. – No. 1. – pp. 23-36. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/2>. – URL: <https://www.elibrary.ru/nsvcyi>.
12. The study of spectrometric parameters of seeds as the basis for the intensification of the process of reforestation of common pine crops of the Negorelskaya variety : grant RNF 23-26-00228 / A.I. Novikov, S.V. Rebko, T.P. Novikova, E.P. Petrishchev. – M. : Russian Scientific Foundation, 2023. – URL: <https://elibrary.ru/jtyxux>.
13. Novikov, A.I. Investigation of spectrometric parameters of the seed peel of scots pine in the infrared range / A.I. Novikov, V.V. Saushkin // Lesotechnical journal. – 2018. – Vol. 8. – No. 3. – pp. 30-37. – DOI: [https://doi.org/10.12737/article\\_5b97a164e41782.20107217](https://doi.org/10.12737/article_5b97a164e41782.20107217). – URL: <https://elibrary.ru/votakr>.
14. Novikova, T.P. Analysis of terminology of the countries of the world engaged in active forestry activities in the field of research of spectrometric properties of forest seeds : certificate of state registration of the database No. 2023624886 Russian Federation / T.P. Novikova, A.I. Novikov, E.P. Petrishchev. – No. 2023624495 ; application 02.12.2023 ; reg. 12/22/2023. – URL: <https://elibrary.ru/ljghq>.
15. Novikova, T.P. The influence of physical and mechanical properties of soil on the process of adaptive reforestation / T.P. Novikova, E.P. Petrishchev, A.I. Novikov // Forestry : Materials of the 88th scientific and technical conference of faculty, researchers and postgraduates (with international participation). – Minsk : Belarusian State Technological University, 2024. – pp. 291-294. – URL: <https://elibrary.ru/jaikmm>.
16. Petrishchev, E.P. Results of research on the sowing qualities of Scots pine seeds (*Pinus sylvestris* L., variety Negorelskaya) and determination of the Dixon quality index of 60-day seedlings in a container nursery : certificate of state registration database No. 20236 / E.P. Petrishchev, T.P. Novikova, A.I. Novikov. – URL: <https://www.elibrary.ru/gwhapl>.
17. Results of morphometric studies of seeds of scots pine (*Pinus sylvestris* L., variety Negorelskaya) : certificate of state registration of the database No. 2023624679 Russian Federation / E.P. Petrishchev, T.P. Novikova, S.V. Rebko, A.I. Novikov. – No. 2023624380 : application 01.12.2023 : publ. 18.12.2023. – URL: <https://elibrary.ru/dyexbk>.
18. Poplavskaya, L.F. Results of zoning of the Negorelskaya common pine in the Republic of Belarus / L.F. Poplavskaya, S.V. Rebko, P.V. Tupik // Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry, environmental management and processing of renewable resources. – 2021. – T. 1. – № 240. – P. 58-67. – DOI: <https://doi.org/10.52065/2519-402x-2021-240-7-58-67>. – URL: <https://www.elibrary.ru/sxivbp>.
19. Priyatkin, N.S. Noninvasive rapid assessment of the heterogeneity and economic suitability of seed material based on the use of instrumental physical methods: dissertation of the Doctor of Biological Sciences: 4.1.5 / N.S. Priyatkin. – St. Petersburg : AFI, 2023. – 253 p. – URL: <https://elibrary.ru/aseotz>.
20. Interrelations between geometric and gravimetric parameters of Scots pine seeds / S.V. Rebko, A.I. Novikov, T.P. Novikova, E.P. Petrishchev // Proceedings of BSTU. Series 1 - Forestry, environmental management and processing of renewable resources. – 2024. – vol. 276. – pp. 66-76. – DOI: <https://doi.org/10.52065/2519-402X-2024-276-8>. – URL: <https://elibrary.ru/lgtvsz>.

21. Deep-Learning Approach for Fusarium Head Blight Detection in Wheat Seeds Using Low-Cost Imaging Technology / R.C. Bernardes, A. De Medeiros, L. da Silva et al. // *Agriculture*. – 2022. – Vol. 12. – № 11. – P. 1801. – DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12111801>.
22. Classification of *Phaseolus lunatus* L. using image analysis and machine learning models / É.B. de L. Castro, R. de S. Melo, E.M. da Costa et al. // *Revista Caatinga*. – 2022. – Vol. 35. – № 4. – P. 772-782. – DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-21252022v35n404rc>.
23. Evdokimova, S.A. Segmentation of store customers to increase sales using ABC-XYZ-analysis and clustering methods / S.A. Evdokimova // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 2032. – № 1. – P. 012117. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2032/1/012117>.
24. Landscape-Scale Mixtures of Tree Species are More Effective than Stand-Scale Mixtures for Biodiversity of Vascular Plants, Bryophytes and Lichens / S. Heinrichs, C. Ammer, M. Mund et al. // *Forests*. – 2019. – Vol. 10. – № 1. – P. 73. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f10010073>.
25. Ivetić, V. The role of forest reproductive material quality in forest restoration / V. Ivetić, A.I. Novikov // *Forestry Engineering Journal*. – 2019. – Vol. 9. – № 2. – P. 56-65. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.2/7>.
26. Jing, Y. Establish seedling quality classification standard for *Chrysanthemum* efficiently with help of deep clustering algorithm / Y. Jing, H. Zhao, S. Yu // *ArXiv*. – 2024. – P. 1-12. – DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.08867>.
27. Robust seed germination prediction using deep learning and RGB image data / Y. Nehoshtan, E. Carmon, O. Yaniv et al. // *Scientific Reports*. – 2021. – Vol. 11. – № 1. – P. 22030. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01712-6>.
28. X-ray analysis of seed quality of *Eucommia ulmoides* Oliv. of different geographical origin / Q.T. Nguyen, S.G. Sakharova, N.S. Priyatkin, A.V. Zhigunov // *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhniceskoj akademii*. – 2021. – № 234. – P. 134-151. – DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2021.234.134-151>.
29. Novikov, A.I. Visible wave spectrometric features of Scots pine seeds: the basis for designing a rapid analyzer / A.I. Novikov // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 226. – № 1. – P. 012064. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012064>.
30. Mechanization of coniferous seeds grading in Russia: a selected literature analysis / A.I. Novikov, B.T. Ersson, V.V. Malyshev et al. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2020. – Vol. 595. – P. 012060. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/595/1/012060>.
31. Novikov, A.I. The effect of seed coat color grading on height of one-year-old container-grown Scots pine seedlings planted on post-fire site / A.I. Novikov, V. Ivetić // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 226. – P. 012043. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012043>.
32. Novikov, A.I. The effect of seed size grading on seed use efficiency and height of one-year-old container-grown Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings / A.I. Novikov, V. Ivetić // *Reforesta*. – 2018. – Vol. 6. – P. 100-109. – DOI: <https://doi.org/10.21750/REFOR.6.08.61>.
33. Scots pine seedlings growth dynamics data reveals properties for the future proof of seed coat color grading conjecture / A.I. Novikov, V. Ivetić, T.P. Novikova, E.P. Petrishchev // *Data*. – 2019. – Vol. 4. – № 3. – P. 106. – DOI: <https://doi.org/10.3390/data4030106>.
34. Novikov, A.I. Non-destructive quality control of forest seeds in globalization: problems and prospects of output innovative products / A.I. Novikov, T.P. Novikova // *Globalization and Its Socio-Economic Consequences* / T. Klietnik ed. – Rajecke Teplice, Slovakia : Univ Zilina, 2018. – P. 1260-1267.
35. Dickson Quality Index: relation to technological impact on forest seeds / A.I. Novikov, S. Rabko, T.P. Novikova, E.P. Petrishchev // *Forestry Engineering Journal*. – 2023. – Vol. 13. – № 1. – P. 23-36. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/2>.
36. Performance of Scots pine seedlings from seeds graded by colour / A.I. Novikov, S.V. Sokolov, M.V. Drapalyuk et al. // *Forests*. – 2019. – Vol. 10. – № 12. – P. 1064. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f10121064>.

37. FLR-Library reference information system for adaptive forest restoration: the information model / T. Novikova, A. Novikov, V. Lisitsyn, E. Petrishchev // *Forestry Engineering Journal*. – 2023. – Vol. 13. – № 4. – P. 114-124. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/7>.
38. Novikova, T. Studying the spectrometric features of forest seeds to improve sowing qualities: a retrospective cluster analysis of the scientific landscape trends / T. Novikova, A. Novikov, E. Petrishchev // *Forestry Engineering Journal*. – 2023. – Vol. 13. – № 4. – P. 23-39. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/1>.
39. Novikova, T.P. The choice of a set of operations for forest landscape restoration technology / T.P. Novikova // *Inventions*. – 2022. – Vol. 7. – № 1. – P. 1. – DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions7010001>.
40. Novikova, T.P. FLR-Library reference information system for adaptive forest restoration: cluster analysis of descriptors / T.P. Novikova, A.I. Novikov, E.P. Petrishchev // *Forestry Engineering Journal*. – 2023. – Vol. 13. – № 3. – P. 164-179. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/12>.
41. Novikova, T.P. Reforestation pipeline: case for quality management of NIR-region grading of Scots pine seeds and FLR-algorithm for information processing / T.P. Novikova, E.P. Petrishchev, A.I. Novikov // *Silva Balcanica*. – 2023. – Vol. 24. – № 3. – P. 5-16. – DOI: <https://doi.org/10.3897/silvabalcanica.24.e114699>.
42. Novikova, T.P. The VIS-spectrometric data of Scots pine individual seed reveal forecasting potential for container-grown germination and seedling's Dickson quality index / T.P. Novikova, E.P. Petrishchev, A.I. Novikov // *Preprints*. – 2023. – № 1. – DOI: <https://doi.org/10.20944/preprints202312.0561.v1>.
43. The Root Collar Diameter Growth Reveals a Strong Relationship with the Height Growth of Juvenile Scots Pine Trees from Seeds Differentiated by Spectrometric Feature / T.P. Novikova, P. Tylek, C.B. Mastrangelo et al. // *Forests*. – 2023. – Vol. 14. – № 6. – P. 1164. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f14061164>.
44. Desired REgeneration through Assisted Migration (DREAM): Implementing a research framework for climate-adaptive silviculture / A.A. Royo, P. Raymond, C.C. Kern et al. // *Forest Ecology and Management*. – 2023. – Vol. 546. – № October. – P. 121298. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121298>.
45. Dynamics of biodiversity of nectar-bearing resources in the structure of birch forests / I. Samsonova, V. Do, T. Nguen, P. Sidarenko Petr // *Forestry Engineering Journal*. – 2020. – Vol. 9. – № 4. – P. 73-81. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.4/8>.
46. Study of biodiversity and assessment of the state of common hazel (*Corylus avellana* L.) in the Voronezh region / V. Slavskiy, T. Nakonechnaya, E. Titov, Z. Govedar // *Forestry Engineering Journal*. – 2022. – Vol. 12. – № 3. – P. 51-61. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.3/5>.
47. How to increase the analog-to-digital converter speed in optoelectronic systems of the seed quality rapid analyzer / S. V. Sokolov, V. V. Kamenskij, A.I. Novikov, V. Ivetić // *Inventions*. – 2019. – Vol. 4. – № 4. – P. 61. – DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions4040061>.
48. Sokolov, S.V. New optoelectronic systems for express analysis of seeds in forestry production / S.V. Sokolov, A.I. Novikov // *Forestry Engineering Journal*. – 2019. – Vol. 9. – № 2. – P. 5-13. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.2/1>.
49. *Advances in forest restoration management and technology* / J.A. Stanturf, R.K. Dumroese, S. Elliott et al. – New York, NY : Oxford University Press, 2024. – 297-334 p.
50. Adaptive silviculture for climate change in the Great Lakes- St. Lawrence Forest Region of Canada: Background and design of a long-term experiment / N. Thiffault, J. Fera, M.K. Hoepting et al. // *The Forestry Chronicle*. – 2024. – Vol. 100. – № 2. – P. 155-164. – DOI: <https://doi.org/10.5558/tfc2024-016>.
51. Verheyen, K. Soil physical characteristics predict sapling performance in recent afforestation projects in Flanders (northern Belgium) subjected to drought / K. Verheyen, K. Haegeman, W. Cornelis // *Forest Ecology and Management*. – 2024. – Vol. 572. – P. 122304. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122304>.

### Сведения об авторе

✉ *Новикова Татьяна Петровна* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры компьютерных технологий и микроэлектронной инженерии, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация; <http://orcid.org/0000-0003-1279-3960>, e-mail: [novikova\\_tp.vglta@mail.ru](mailto:novikova_tp.vglta@mail.ru).

### Information about the author

*Tatyana P. Novikova* – Cand. Sci. (Technical), Docent, Chair of Computer Technology and Microelectronic Engineering, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, <http://orcid.org/0000-0003-1279-3960>, e-mail: [novikova\\_tp.vglta@mail.ru](mailto:novikova_tp.vglta@mail.ru).

✉ – Для контактов | Corresponding author