

Научный обзор

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/1>

УДК 630\*232.3



## Изучение спектрометрических особенностей лесных семян для улучшения посевных качеств: ретроспективный кластерный анализ направлений научного ландшафта

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

Артур И. Новиков, [arthur.novikov@vglta.vrn.ru](mailto:arthur.novikov@vglta.vrn.ru) <https://orcid.org/0000-0003-1230-0433>

Евгений П. Петрищев , [petrishchev.vgltu@mail.ru](mailto:petrishchev.vgltu@mail.ru) <https://orcid.org/0000-0002-1395-3631>

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

Спектральные данные лесных семян в видимом и инфракрасном диапазонах длин электромагнитного излучения достаточно эффективно дифференцируют происхождение, жизнеспособность, виды семян, их зараженность вредителями и болезнями, способность впитывать и терять воду. Поиск одновременно инструментально простого, быстрого и эффективного для прогнозирования всхожести способа тестирования семян необходим для повышения энергоэффективности лесных питомников при производстве посадочного материала. Ретроспективная систематизация источников ( $N = 55$ , 1998-2023 годы, терм [*Scholar Query = seeds\* AND (spectr\* OR optic\*) (properties OR features) AND analysis*]) в кластеры проведена на основании восьми критериев эффективности, представленных ранговыми переменными. Уровень сходства и различия между кластерами определен методом наиболее отдаленных соседей с группировкой данных по квадрату евклидова расстояния. Наиболее отдаленный от других критерий – уровень инвазивности тестирования (квадрат Евклидова расстояния – 25,  $p < 0.05$ ). Корреляционный анализ непараметрических критериев указывает на прямое сильное взаимодействие между уровнем финансовых и организационных затрат (коэффициент Спирмена  $\rho = 0,77$ ;  $p = 0.0008$ ), временных затрат и малой возможности машинного обучения ( $\rho = 0,725$ ;  $p = 0.0008$ ). В будущем планируется периодически дополнять набор систематических данных для получения объективной оценки способов тестирования семян, а также с помощью паспорта семени оценить взаимосвязь RGB-спектральных данных более 1000 отдельных семян с ранним ростом сеянцев на пост-пирогенном экспериментальном участке лесного ландшафта Воронежской области на примере (*Pinus sylvestris* L. var. *Negorelskaya*).

**Ключевые слова:** лесные семена, тестирование семян, впитывание воды семенами, всхожесть семян, качество семян, искусственное лесовосстановление, планшетный сканер, RGB-спектральные данные, сегментирование изображения

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

**Заявление о доступности данных:** данные систематического поиска, представленные в этом исследовании, находятся в открытом доступе в научном репозитории – [набор данных] Novikova, Tatyana; Novikov, Arthur; Petrishchev, Evgeniy (2023), “Systematic data on trends in the scientific landscape in the field of studying the spectrometric properties of seeds (reference refilled dataset)”, Mendeley Data, V1, doi: <https://doi.org/10.17632/mrnc48tfxy.1>

**Благодарности:** авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Новикова Т. П. Изучение спектрометрических особенностей лесных семян для улучшения посевных качеств: кластерный анализ направлений научного ландшафта / Т. П. Новикова, А. И. Новиков, Е. П. Петрищев // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 4 (52). – Ч. 1. – С. 23–39. – Библиогр.: с. 32–36 (64 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/1>.

*Поступила* 25.08.2023. *Пересмотрена* 05.12.2023. *Принята* 06.12.2023. *Опубликована онлайн* 29.12.2023.

Review

### Studying the spectrometric features of forest seeds to improve sowing qualities: a retrospective cluster analysis of the scientific landscape trends

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

Arthur I. Novikov, [arthur.novikov@vglta.vrn.ru](mailto:arthur.novikov@vglta.vrn.ru)  <https://orcid.org/0000-0003-1230-0433>

Evgeniy P. Petrishchev , [petrishchev.vgltu@mail.ru](mailto:petrishchev.vgltu@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0002-1395-3631>

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

#### Abstract

Forest seeds spectral data in the visible and infrared regions of electromagnetic radiation lengths quite effectively differentiate the origin, viability, types of seeds, their infestation with pests and diseases, the ability to absorb and lose water. The search for a method of seed testing that is both experimentally simple, fast and effective for predicting germination is necessary to increase the energy efficiency of forest nurseries in the production of planting material. The retrospective references systematization (N = 55, 1998-2023, terms [*Scholar Query = seeds\* AND (spectr\* OR optic\*) (properties OR features) AND analysis*]) into clusters was carried out on the basis of eight performance criteria represented by rank variables. The level of similarity and difference between clusters is determined by the method of the most distant neighbors with the grouping of data by the square of the Euclidean distance. The most distant criterion from other criteria is the level of invasiveness of testing (the square of the Euclidean distance is 25,  $p < 0.05$ ). Correlation analysis of non-parametric criteria indicates a direct strong interaction between the level of financial and organizational costs (Spearman coefficient  $\rho = 0.77$ ;  $p = 0.0008$ ), time costs and low machine learning capability ( $\rho = 0.725$ ;  $p = 0.0008$ ). In the future, it is planned to periodically supplement the set of systematic data to obtain an objective assessment of seed testing methods, as well as using a seed passport to evaluate the relationship of RGB spectral data of more than 1 000 individual seeds with early growth of seedlings in a post-pyrogenic experimental site of the forest landscape of the Voronezh region by example (*Pinus sylvestris* L. var. *Negorelskaya*).

**Keywords:** *forest seeds, seed spectrometric features, seed testing, seed quality, forest landscape restoration, flat-bed scanner, image capturing technique, VIS | RGB spectral data, scanning area, scanning resolution, seed's image segmentation*

**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:** The systematic search data presented in this study is publicly available in the scientific repository – [dataset] Novikova, Tatyana; Novikov, Arthur; Petrishchev, Evgeniy (2023), “Systematic data on trends in the scientific landscape in the field of studying the spectrometric properties of seeds (reference refilled dataset)”, Mendeley Data, V1, doi: <https://doi.org/10.17632/mrnc48tfx.1>

**Acknowledgments:** authors thank the reviewers for their contribution to the peer review.

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Novikova T. P., Novikov A. I., Petrishchev E. P. (2023). Studying the spectrometric features of forest seeds to improve sowing qualities: cluster analysis of the scientific landscape trends. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 4 (52), part 1, pp. 23-39 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/1>.

*Received* 25.08.2023. *Revised* 05.12.2023. *Accepted* 06.12.2023. *Published online* 29.12.2023.

### Введение

Эффективность лесонасаждений (лесных плантаций [35], лесосеменных участков [28], в частности) зависит от продуктивности и устойчивости к биотическим и абиотическим факторам [31; 64] среды используемых лесных культур. В свою очередь, эти характеристики детерминированы на генетическом уровне [52; 63] и обуславливают качество лесного репродуктивного материала [1; 13; 24; 58]. Продуктивность лесных культур можно повысить путем селекционных испытаний. Гибрид сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L., var. *Negorelskaya*) является селекционным сортом, отличается интенсивным ростом и ранним обильным семеношением, что повышает эффективность лесосеменных плантаций и продуктивность искусственных насаждений (до 15%) [8]. При этом качество сеянцев (*P. sylvestris*, var. *Negorelskaya*), при прочих равных условиях, будет определяться качеством семян [11; 22; 23]. Качество семян [27] тесно коррелирует с их спектрометрическими свойствами [2–4]. Более того, от качества семян [27; 36; 37; 43; 44; 46; 47; 49; 51; 57] зависит эффективность выполнения группы операций высева (в том числе и аэросева [48] на труднокультивируемых площадях).

Масштаб выполняемого с 01.03.2023 года финансируемого исследовательского проекта [6] – проследить, оценить, оптимизировать и проанализировать весь цикл получения лесного репродуктивного материала на примере (*P. sylvestris*, var. *Negorelskaya*), набирая банк данных [45] в виде наборов данных, депонированных в Mendeleu Data, структура которых защищена свидетельствами на БД, начиная от результатов изучения VIS-спектрометрических, морфологических, гравиметрических свойств семени до наблюдения биометрических параметров онтогенетического развития сеянца в первый вегетационный период (с 28.03.2024 по 30.10.2024) после пересадки на экспериментальный участок лесовосстановления

осенью 2023 года (с утвержденным актом создания экспериментального участка) с учетом природно-производственных условий произрастания.

Перед высевом, произведенным 22.06.2023 в 40-ячеистые сайд-слит контейнеры [5], Т.П. Новиковой было предложено исследовать RGB-спектральные данные семян (*P. sylvestris*, var. *Negorelskaya*) группами по 40 семян (рисунок 1), порядок раскладки которых на стекле планшетного сканера соответствовал бы порядку их последующего высева в контейнер. Это, по мнению Торбьорна Лестандера и Пола Джеладди (Swedish University of Agricultural Sciences, 2005), может снизить уровень шума в сравнении с исследованием отдельного семени [32].

Изучение спектрометрических особенностей семян в различное время проводили: Khouja et al. (2023) [11], Li et al. (2020) [14], Tigabu et al. (2019) [19], Agelet et al. (2014) [7], Novikova et al. (2023a) [18], Hu et al. (2017) [9], Novikov (2019) [16], Novikova et al. (2023b) [17], Lestander & Geladi (2003) [13], Keefe & Davis (2012) [10], Vale et al. (2020) [21], Dell'Aquila (2009) [5], Bernardes et al. (2022) [3], Lestander & Geladi (2005) [12], Wang et al. (1999a) [25], Araújo et al. (2016) [2], Tigabu et al. (2005) [20], Maghirang et al. (2003) [15], Wang et al. (1999b) [23], Farhadi et al. (2016) [8], Wang et al. (1999c) [24], Dowell (1998) [6], Wang et al. (1999d) [22], McDonald et al. (2015) [1], Beatriz et al. (2022) [4], ElMasry et al. (2019) [7] и другие группы ученых.

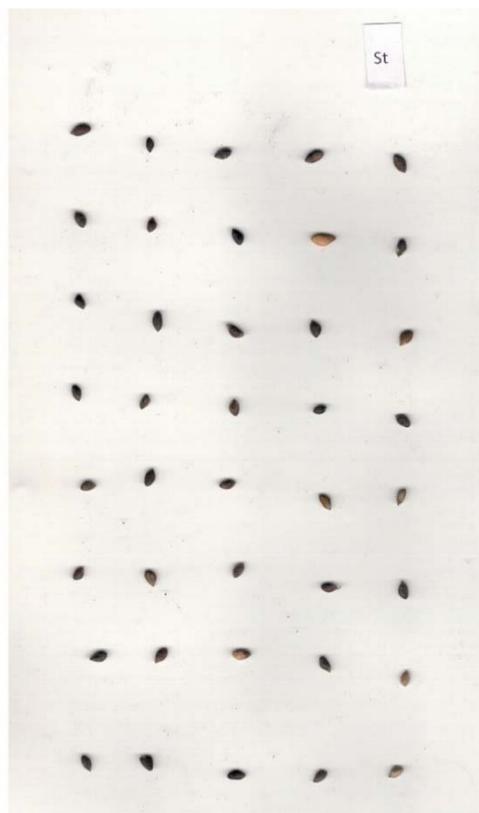


Рисунок 1. Образец дорсального изображения группы из 40 семян (*P. sylvestris*, var. *Negorelskaya*), созданный с помощью планшетного сканера (азрешение 300 dpi, область сканирования 1718\*3309 pix, TIFF-формат), расположенных в порядке, соответствующем последующему высеву в 25 контейнер

Figure 1. A sample of a dorsal image of a group of 40 seeds (*P. sylvestris*, var. *Negorelskaya*), created using a flat-bed scanner (resolution 300 dpi, scan area 1718\*3309 pix, TIFF storage format), arranged in the order corresponding to subsequent seeding in a 25 container

Источник: собственная композиция автора Новиковой Т.П. (21.06.2023)

Source: author's own composition by Novikova T.P. (21.06.2023)

Процедуры исследования спектрометрических показателей отдельного семени и групп семян проводится с использованием разных технических средств (табл. А2) для создания источника света и

\* (пер. с англ.) Несмотря на то, что ни один режим измерения (коэффициент отражения, пропускания) не привел к получению наилучших результатов калибровки, при работе с разнородными

детектирования спектральных данных. Торбьорн Лестандер и Пол Гелади [33] в работе «*NIR spectroscopic measurement of moisture content in Scots pine seeds*», опубликованной в журнале «*The Analyst*» в 2003 году, использовали для изучения процесса «имбибиция – дессикация» групп (40-50) семян и отдельного семени детектирование коэффициента диффузного отражения  $R$  в диапазоне длин волн 780-2498 нм (в действительности до 2280 нм вследствие «шума» в оптоволокне) и детектирование коэффициента пропускания  $T$  в диапазоне 850-1048 нм. Ученые рассчитывали степень поглощения как  $X = \log^{10}(1/R)$  для коэффициента отражения или как  $X = \log^{10}(1/T)$  – для коэффициента пропускания, широко применяемых в разных исследованиях оптометрических свойств семян *Pinus sylvestris* L. [40].

Достаточно категоричное мнение Agelet и соавторов (2014) – «*although no measurement mode (reflectance, transmittance) have lead to the best reported calibrations, when dealing with heterogeneous seeds reflectance is the best working mode\** [21]» – никаким образом не приближает ответ на о лучшем способе исследования спектрометрических свойств в лесных семенах ИК-регионе спектра, поскольку отсутствует прямое указание критерия предпочтения одного способа перед другим.

Приложив некоторые усилия к выдвигению гипотезы о том, что технологическое воздействие на семена электромагнитного излучения в видимом и БИК-регионах, иногда в сочетании с другими методами (X-Ray, IDS) дифференцирует посевные качества, определили в качестве цели данного исследования оценку степени эффективности применения способов и технических средств для детектирования спектрометрических свойств лесных семян по восьми критериям, характеризующим степень затрат на подготовку и проведение эксперимента при производстве высококачественного посадочного материала, в том числе и для адаптивного восстановления лесных ландшафтов [53].

семенами лучшим рабочим режимом является коэффициент отражения.

Материалы и методы

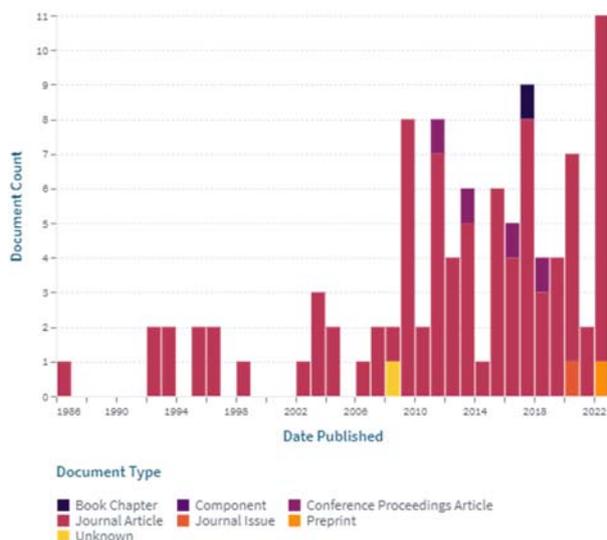
Предмет и объект исследований

Объект исследований – набор данных ретро-спективного [9; 10; 41] систематического поиска в области изучения спектрометрических свойств лесных семян [39].

Предмет исследований – взаимосвязь технологического воздействия на единичное лесное семя оптического излучения с длинами волн в видимой и инфракрасной регионах спектра при детектировании оптических свойств с улучшением посевных качеств семени и уровнем виталитета молодого растения.

Сбор данных

Ориентируясь на заданный в техническом задании поисковый запрос [*Scholar Query = seeds\* AND (spectr\* OR optic\*) (properties OR features) AND analysis*], и применяя LENS-поисковую систему, аналогично изысканиям А.И. Новикова и соавторов (2023) [46], с фильтром глубины поиска [*publishedDate.from = 1966-01-01, publishedDate.to = 2024-04-03*], получили набор, возвращающий 55 результатов. Динамика выхода источников и профили ученых, имеющих наибольшее число публикаций относительно данного термина, представлена на рис. 2.



a | a

Профили известных авторов



b | b

Рисунок 2. Динамика выпуска источников информации (N = 55) по времени и видам (а), по авторам (б); терм [*Scholar Query = seeds\* AND (spectr\* OR optic\*) (properties OR features) AND analysis*], Figure 2. Dynamics of the release of scientific publications (N = 55) by time and type (a), by authors (b); term [*Scholar Query = seeds\* AND (spectr\* OR optic\*) (properties OR features) AND analysis*] term

Источник: <https://www.lens.org/>, компоновка диаграмм по запросу авторов, данные по состоянию на 10.10.2023.

Source: <https://www.lens.org/>, layout at the request of the authors, data as of 10.10.2023.

Далее, просматривая каждую публикацию, обращали особое внимание на раздел «Материалы и методы», отсеивая источники либо не относящиеся к теме, либо не содержащие конкретных данных, отобрали 26 источников, фрагмент таблицы которых приведен в приложении А (таблица А1).

Оценку способов изучения оптометрических свойств семян проводили на основании критериев (табл. 1), представляющих собой числовые ранговые переменные степени влияния (1 – низкая степень влияния на критерий; 2 – умеренная степень влияния; 3 – сильная | высокая степень влияния), условно определенные таким образом, чтобы максимальный ранг (3) соответствовал ухудшению критерия, а минимальный (1) – улучшению критерия.

Таблица 1

Оценочные критерии для проведения кластерного анализа результатов систематического поиска (терм [Scholar Query = seeds\* AND (spectr\* OR optic\*) (properties OR features) AND analysis]) в области изучения оптометрических свойств лесных семян

Table 1

Evaluation criteria for cluster analysis of the results of a systematic search (term [Scholar Query = seeds\* AND (spectr\* OR optic\*) (properties OR features) AND analysis]) in the field of studying the optometric properties of forest seeds

Критерий степени воздействия излучения на семена	Критерий организационных затрат на проведение исследования	Критерий инвазивности (0 – нет; 1 – да)	Критерий финансовых затрат	Критерий временных затрат	Критерий неиспользования в портативных устройствах	Критерий малой точности идентификации семени	Критерий малой возможности машинного обучения с использованием нейросетей
Crt 1	Crt 2	Crt 3	Crt 4	Crt 5	Crt 6	Crt 7	Crt 8

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Анализ данных

На основе структурирования данных о технологическом воздействии на семена электромагнитного излучения в видимом и БИК-регионе по представленным в табл. 1 критериям эффективности тестирования лесных семян, представляющим ранговые (Crt1, 2, 4-8) и бинарную переменную (Crt3), строили виолин-плот, демонстрирующий основные статистики. Далее данные рассматривали в корреляционном анализе, в основе которого лежал непараметрический двусторонний коэффициент  $\rho$ -Спирмена, визуализируемый «тепловой» картой

(heatmap) и картой уровней значимости  $p$  с помощью пакета прикладных статистических программ GraphPad Prism, версия 8. Реализовывали кластерный анализ с использованием метода наиболее отдаленных соседей для описания сходства и различия [40] между способами тестирования семян, используемыми в источниках информации. Структурирование данных выполняли в статистическом пакете [19] SPSS Statistics, версия 25, с использованием интервальной меры квадрата евклидова расстояния, а визуализацию дендрограммой.

Результаты

Динамика ранговых переменных Crt1-Crt8 показана на рис. 3.

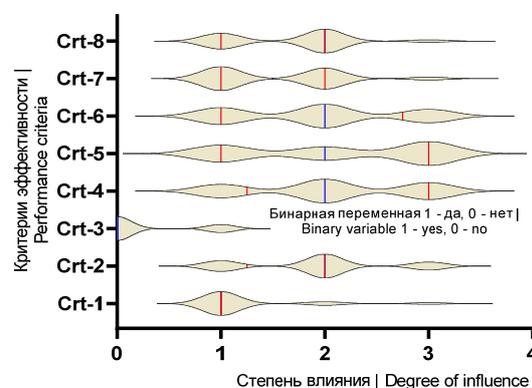


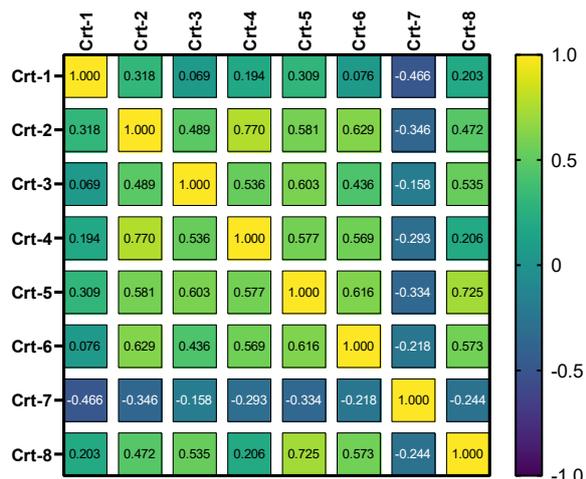
Рисунок 3. Виолин-плот критериев эффективности из таблицы 1 изучения спектрометрических свойств лесных семян в зависимости от степени влияния (1 – слабое, 2 – умеренное, 3 – сильное): красная вертикальная линия – 25 и 75 процентиля; синяя линия – медиана

Figure 4. Violin-plot of effectiveness criteria from table 1 of studying the spectrometric properties of forest seeds depending on the degree of influence (1 – weak, 2 – moderate, 3 – strong): The red vertical line is the 25th and 75th percentiles; the blue line is the median

Источник: собственная композиция авторов

Source: own composition

Взаимосвязь между ранговыми переменными, характеризующими эффективность проведения исследований спектрометрических свойств лесных семян, представлена на рис. 4.



*a* | *a*

<i>p</i>	Crt-1	Crt-2	Crt-3	Crt-4	Crt-5	Crt-6	Crt-7	Crt-8
Crt-1		0,2179	1,0000	0,5208	0,2518	0,7708	0,1375	0,5554
Crt-2	0,2179		0,0846	0,0008	0,0181	0,0174	0,2108	0,0804
Crt-3	1,0000	0,0846		0,0571	0,0220	0,1264	0,5692	0,0544
Crt-4	0,5208	0,0008	0,0571		0,0265	0,0268	0,3149	0,4312
Crt-5	0,2518	0,0181	0,0220	0,0265		0,0110	0,2151	0,0039
Crt-6	0,7708	0,0174	0,1264	0,0268	0,0110		0,4552	0,0263
Crt-7	0,1375	0,2108	0,5692	0,3149	0,2151	0,4552		0,3738
Crt-8	0,5554	0,0804	0,0544	0,4312	0,0039	0,0263	0,3738	

*b* | *b*

Рисунок 4. Корреляционная матрица (*a*) и карта уровней значимости двустороннего коэффициента  $\rho$ -Спирмена (*b*) критериев эффективности изучения спектрометрических свойств лесных семян: желтым цветом на рисунке (*b*) выделены значения  $p < 0.05$ , зеленым – значения  $p < 0.01$

Figure 4. Heatmap (*a*) and the significance levels map of the two-way  $\rho$ -Spearman coefficient (*b*) criteria for the effectiveness of studying the spectrometric properties of forest seeds: yellow in (*b*) shows the values of  $p < 0.05$ , green  $p < 0.01$

Источник: собственная композиция авторов  
Source: own composition

Диаграмма сходства и различия исследований спектрометрических свойств лесных семян по критериям эффективности Crt1-Crt8 (табл. 1) представлена на рис. 5.

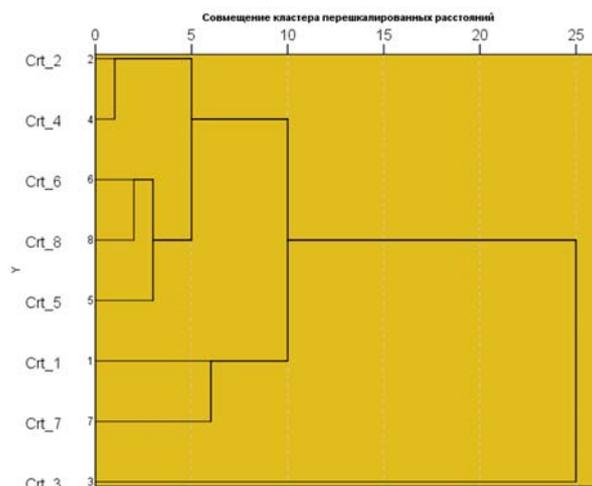


Рисунок 3. Кластеризация критериев эффективности изучения спектрометрических свойств лесных семян

Figure 3. Clustering of criteria for the effectiveness of studying the spectrometric properties of forest seeds  
Источник: собственная композиция авторов  
Source: own composition

### Обсуждение

*Как размеры и форма семени могут влиять на качество детектирования спектрометрических свойств?*

Изменчивость размеров, формы, толщины внешней защитной оболочки индивидуального лесного семени, в особенности при наличии у семени перикарпа (например, желуди, каштаны и др.) оказывает достаточно сильное влияние на изменение расстояния [21] (включая фокусное), пройденного оптическим лучом от источника света до семени и расстояния, пройденное диффузно отраженным (или трансмиссионным) лучом от семени до чувствительного элемента детектирующей системы [38].

Траектория диффузно отраженного от оболочки отдельного семени луча непременно будет зависеть от степени неоднородности внешней оболочки, а трансмиссионного – от степени неоднородности эндосперма и других внутренних элементов семени, что подтверждают, например, Agelet и соавторы (2014) [21]. размер зерен пшеницы значительно влияет на спектры отражения в видимой и ближней инфракрасной областях спектра. При этом

в исследовании Ванга и соавторов (1999) с уменьшением размера отдельного семени точность определения класса цвета красных зерен увеличилась, а белых зерен снизилась [61]. Более того, площадь проекции отдельного семени является одним из наиболее важных факторов, влияющих на погрешности измерения спектрометрических параметров, вызванные изменением размера семени. Средние спектральные кривые в БИК-диапазоне (400-2400 нм) показали, что количество излучения, поглощаемого семенем, уменьшалось с увеличением размера семени [62].

При этом прогнозирующая способность изучения оптометрических свойств отдельного семени в ИК-регионе спектра будет чувствительно зависеть от характеристик измерительных приборов [21] и степени изношенности (юстировки) оптической схемы.

*Как способность семени впитывать и отдавать влагу может влиять на качество детектирования спектрометрических свойств?*

Неоднократно исследовано [18; 59], что существует универсальное явление, заключающееся в том, что мертвые (пустые; окаменелые, не поддающиеся отделению на аэросепараторе) семена высыхают быстрее, чем жизнеспособные [59].

Поэтому способ определения показателя жизнеспособности единичного семени (*single seed*), например, *Pinus massoniana* Lamb., *Pinus tabulaeformis* Carrière и *Pinus elliottii* Engelm, с помощью БИК-излучения является комбинированным, как у Tigabu et al. (2019) [59]. Имбибиция-дессикация (ID) [18; 59] плюс дифференциация единичного семени на жизнеспособное | нежизнеспособное в БИК-диапазоне может реализовываться применением всеобщей для трех указанных видов калибровочной модели, возможно, эффективной на том же уровне, что и калибровочная модель для отдельных видов.

Вероятно, что в зависимости от уровня влаги, содержащейся в семенах, детектирующий ИК-луч будет проходить разный путь по длине и по траектории, прежде чем достигнет чувствительного элемента, преобразующего через АЦП [56] сигнал в цифровой вид для последующей обработки в микропроцессоре.

Тем не менее, недостаточно исследованный механизм скорости впитывания влаги [17] и следующего сразу же высушивания, их влияния на показатель всхожести, например, семян хвойных видов деревьев, не дает основания категорически заключать о достаточно высокой эффективности БИК-грейдирования, особенно, если оценивать по отношению «качество семени – затраты на достижение уровня качества».

Тем не менее, исследования Торбьорна Лестандера и Пола Джелади (Swedish University of Agricultural Sciences, 2005), проведенные на семенах *P. sylvestris*, выявили пять особенностей изучения спектрометрических свойств семян относительно механизма впитывания воды [32]:

1. Пики содержания воды не всегда имеют большое значение для калибровки, чем наклон перед пиками на спектрограмме.

2. Увеличение содержания воды изменяет водородную связь и влияет на форму NIR-пиков содержания воды – для разного содержания воды в семенах разные пики.

3. Связывание воды в семенах не является линейным процессом, а происходит в четко выраженные стадии (переходы), что подтверждается исследованиями А.И. Новикова и соавторов [17] при иммерсионном замораживании семян погружением в воду.

4. Увеличение количества градусо-дней выдерживания семени во влажном состоянии приводит к появлению новых NIR-пиков, наиболее вероятно вызванных усилением дыхания и белкового обмена. Эти процессы также могут быть нелинейными.

5. БИК-измерение одиночных семян *P. sylvestris* дает более «шумные» данные, чем измерение групп семян.

Рассуждая об уровне качества детектирования спектрометрических свойств лесных семян, нельзя не отметить, что основной задачей производства лесных семян является получение проростков с высоким виталитетом [7]. Скорее всего, необходимо расширить исследования с лесными семенами, в настоящее время в подавляющем большинстве случаев ограничивающимися только изучением, собственно, семян, на стадию проростка и далее юве-

нильного растения. Существует диаметрально мнение Agelet и соавторов (2014) в журнале «Talanta» (SNIP 2022 – 1.168), занимающихся изучением свойств ядер семян сельскохозяйственных культур (сои и кукурузы), относительно высоких результатов оптического разделения лесного семени по способности впитывать и отдавать воду: «Что касается семян *P. sylvestris* L., результаты Торбьорна Лестандера и Пера Кристера Одена\* (2002) по сортировке семян сосны по их жизнеспособности были высокими, вероятно, потому, что они использовали искусственно убитые семена для класса нежизнеспособных, вместо семян, нежизнеспособных из-за старения, таких как в исследовании Лидии Аджелет и соавторов [21]». Между тем, в 2003 году Lestander & Geladi, несмотря на получение PLS-модели для определения влажности партии семян и отдельного семени *P. sylvestris*, отмечают: «*It seems to be more important to have good raw data than to compensate data by spectral pretreatments*\*\* [33]».

Уровень сложности методик преобразования данных (вейвлет-преобразование | wavelet transformation [34], PLS | OPLS-DA-преобразование [59]), полученных с классических спектрограмм «длина волны – коэффициент отражения | поглощения», достаточно высок, поэтому наблюдается постепенное, но неуклонное смещение способов изучения оптометрических свойств семян в сторону упрощения инструментальных методов: использование детектора с зарядовой связью (сканера) [12] или квантовой эффективности детектирующей матрицы RGB-камеры мобильного устройства.

Коммерческий планшетный сканер [29; 60] используют в сочетании с конструктивным решением в виде наклонного зеркала [29] для дополнительного определения (с учетом искажения) толщины отдельного лесного семени при свободно определяемых в программах серии ImageJ длине и ширине. Данный способ исключает непосредственный контакт семени с инструментом (микрометром или штангенциркулем), «ускоряет процесс изучения, сводит к минимуму искажения, создаваемые

естественным освещением и микроскопами, и позволяет автоматически идентифицировать некоторые оптометрические характеристики на основе значений пикселей VIS-изображения [60]». Временные затраты на сканирование в зависимости от используемой методики могут составлять между 59,9 и 96,5 секундами [60] при разрешении 400 точек на дюйм размере области сканирования 2125 \* 2834 пикселей, что по сравнению с спектроскопическим методом (до 10-15 минут) значительно меньше.

Варьирование областей сканирования с 124\*124 [12] до 2125 \* 2834 [60] и более пикселей, разрешения в 300, 400 [60], 600 и 1200 [12] точек на дюйм, а также вывод изображений в формат JPG [60], TIFF, PNG предполагает отсутствие единого протокола получения рабочего изображения отдельного семени (группы семян) для сегментирования и извлечения оптометрических данных внешней оболочки, а также возможную безвозвратную потерю информации, как указывает «Handbook of machine vision» [25], об изображении семени при сохранении в формат Joint Photographic Experts Group (JPG).

*Как изучение оптометрических параметров семян в видимом (VIS) диапазоне длин волн может влиять на посевные качества?*

Основой изучения оптометрических параметров семян в видимом (VIS) диапазоне длин волн является взаимодействие пары компонентов «информационная система – исследователь».

Антонио Дель Аквилла (2009) в обзоре литературы «Digital Imaging Information Technology Applied to Seed Germination Testing: A Review [16]» вполне четко изложил цель управления информационной системой «images – data – information processing engine» для идентификации семян, чтобы достоверные и гибкие алгоритмы анализа изображений могли интегрировать или заменить визуальный осмотр больших партий семян для тестирования всхожести и энергии прорастания: «*In the case of seed inspection by a vision machine system, the overall goal is to extract from a two-dimensional digital image*

\*Lestander, T.A. Separation of viable and non-viable filled Scots pine seeds by differentiating between drying rates using single seed near infrared transmittance spectroscopy / T.A. Lestander, P.C. Odén // Seed Science and Technology. – 2002. – Vol. 30. – № 2. – P. 383-392.

\*\* (пер. с англ.) Представляется более важным иметь хорошие исходные данные, чем компенсировать данные путем предварительной спектральной обработки

*a considerable amount of data in order to describe germination and radicle growth, and the colour space density of the seed surface\** [16]». Механизм основан на группировке пикселей данного изображения в однородные области относительно контура семени и окружающего фона, то есть инертной подложки, на которой расположены семена [16].

Во многих случаях изучение спектрометрических (NIR [50] и VIS) параметров отдельных лесных семян сочетается с предварительной рентгенографией [29; 59] для точного определения жизнеспособности, IDS- (*Imbibition-Desiccation-Separation*) [59] и MBF- (*Marked, biased, filter*) [29] технологическим воздействием на семена. Очень часто при фенотипировании семени сочетают техники пространственной визуализации, спектроскопии и хемометрии [20]

VIS | RGB показатели изображения отдельного семени как маркеры жизнеспособности семян могут быть количественно определены как средняя плотность для нормализованной площади отдельного семени, и поэтому данные можно легко сравнивать и использовать для кластерного или дискриминантного анализа [16].

Для точного разделения лесных семян на основе непрерывных характеристик, таких как индивидуальная масса отдельного семени, размеры или плотность, максимальное значение в верхнем конце распределения нижних компонентов является целевым порогом, ниже которого удаляются все остальные семена. Однако маловероятно, что истинный экстремум (максимум) наблюдается в простой случайной выборке [29]. Тем не менее, значения поро-

говой плотности (определяется сопоставлением расчетного значения результатов измерения размеров и массы со статусом заполнения семян на R-изображении), ниже которой все семена *Pinus ponderosa* P.Lawson & C.Lawson в сидлотах были пустыми, составила 0,00069 г мм<sup>-3</sup> для замоченной выборки семян и 0,0005259 г мм<sup>-3</sup> для выборки нормальной влажности.

### Выводы

1. Спектрометрические свойства семян могут быть использованы как эффективный инструмент оценки качества адаптации [15; 54] сортовых лесных культур (*P. sylvestris* L. var. *Negorelskaya*) при перемещении по климатическому градиенту [5].

2. Наиболее отдаленный от других критериев эффективности изучения спектрометрических свойств лесных семян – уровень инвазивности тестирования (квадрат Евклидова расстояния – 25,  $p < 0.05$ ).

3. Существует прямое сильное взаимодействие между уровнем финансовых и организационных затрат (коэффициент Спирмена  $\rho = 0,77$ ;  $p = 0.0008$ ), временных затрат и малой возможности машинного обучения ( $\rho = 0,725$ ;  $p = 0.0008$ ).

4. VIS | RGB спектральные показатели изображения отдельного семени могут быть количественно определены как средняя плотность для нормализованной площади отдельного семени, и поэтому данные можно легко сравнивать и использовать для последующего статистического анализа [16].

### Список литературы | References

1. McDonald, M.B. Computer Imaging to Improve Seed Quality Determinations / M.B. McDonald, K. Fujimura, Y. Sako et al. // *Digital Imaging and Spectral Techniques: Applications to Precision Agriculture and Crop Physiology*. – 2015. – P. 15-28. – Mode of access: <http://doi.wiley.com/10.2134/asaspecpub66.c2>.
2. Novikov, A.I. The effect of sorting Scots pine seeds by color and size on their soil germination in containers // *Coniferous boreal zones*. – 2019. – Vol. 37. – № 5. – P. 313-319. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42337219>.
3. New optoelectronic systems for express analysis of seeds in forestry production / S.V. Sokolov et al. // *Forestry Engineering Journal*. – 2019. – Vol. 9, № 2(34). – P. 5-13. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2019.2/1. – <https://elibrary.ru/CNXAWZ>.

\* (пер. с англ.) В случае контроля семян с помощью системы машинного зрения общая цель состоит в извлечении из двумерного

цифрового изображения значительного объема данных для описания всхожести и роста корешков, а также плотности цветowego пространства поверхности семян

4. Novikov, A.I. Express analysis of forest seeds by biophysical methods – Voronezh : Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 2018. – 128 p. – URL: <https://elibrary.ru/yzuzgx>.
5. The effect of the individual seed mass of Negorelskaya variety Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) on 30-day germination in 40-cell SideSlit growing containers / S. Rabko et al. // *Forestry Engineering Journal*. – 2023. – Vol. 13. – № 2. – P. 59-86. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/4>.
6. The study of spectrometric parameters of seeds as the basis for the intensification of the process of reforestation of Scots pine cultivars of the “Negorelskaya” variety : grant RCF 23-26-00228. – M. : RCF, 2023. – URL: <https://elibrary.ru/jtyxux>.
7. The influence of the climatic index of degree days on the vitality of 3-year-old seedlings of scots pine from seeds sorted by spectrometric properties / V.I. Malysheva et al. // *Лесотехнический журнал*. – 2022. – Vol. 12. – № 1. – P. 110-118. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.1/9>.
8. Rebko, S.V. The variety of common pine “Negorelskaya” in Belarus: the first, the only, unique / S.V. Rebko, L.F. Poplavskaya, V.N. Balanchuk // *Forest resources - Belarusian polesie : proceedings of the international conference of young scientists, Gomel, September 24-27, 2018*. – Gomel : Beldruk Printing House LLC, 2018. – P. 66-68. – URL: <https://elibrary.ru/suuwhw>.
9. Sviridov, L.T. The historical aspect of the problem of sorting forest seeds // *Forest in the life of the Eastern Slavs: from Kievan Rus to the present day*. – Gomel : FI NAS B, 2003. – P. 186-190. URL: <https://elibrary.ru/tskkl1>.
10. Sviridov, L.T. Promising technical means for processing coniferous seeds / L.T. Sviridov, N.D. Gomzyakov // *Forestry*. – 2007. – Vol. 2. – P. 44-46. URL: <https://elibrary.ru/hzdxmt>.
11. Andivia, E. How can my research paper be useful for future meta-analyses on forest restoration plantations? / E. Andivia, P. Villar-Salvador, J.A. Oliet et al. // *New Forests*. – 2019. – Vol. 50. – № 2. – P. 255-266. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-018-9631-y>.
12. Bernardes, R.C. 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>.
13. Boelt, B. Multispectral imaging – a new tool in seed quality assessment? / B. Boelt, S. Shrestha, Z. Salimi et al. // *Seed Science Research*. – 2018. – Vol. 28. – № 3. – P. 222-228. – DOI: <https://doi.org/10.1017/S0960258518000235>.
14. Castro, É.B. de L. 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>.
15. Cuzzuol, G.R.F. Relationship between N, P, and K and the quality and stem structural characteristics of *Caesalpinia echinata* Lam. plants / G.R.F. Cuzzuol, C.R.D. Milanez, J.M.L. Gomes et al. // *Trees*. – 2013. – Vol. 27. – № 5. – P. 1477-1484. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-013-0894-9>.
16. Dell’Aquila, A. Digital Imaging Information Technology Applied to Seed Germination Testing: A Review / A. Dell’Aquila // *Sustainable Agriculture* / E. Lichtfouse et al. eds. . – Dordrecht : Springer Netherlands, 2009. – P. 377-388.
17. Dornyak, O. Immersion Freezing of a Scots Pine Single Seed in a Water-Saturated Dispersion Medium: Mathematical Modelling / O. Dornyak, A. Novikov // *Inventions*. – 2020. – Vol. 5. – № 4. – P. 51. – DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions5040051>.
18. Downie, B. Upgrading germinability and vigour of jack pine, lodgepole pine, and white spruce by the IDS technique / B. Downie, B.S.P. Wang // *Canadian Journal of Forest Research*. – 1992. – Vol. 22. – № 8. – P. 1124-1131. – DOI: <https://doi.org/10.1139/x92-149>.
19. Drapalyuk, M. 140th anniversary of the birthday of Alexander Vladimirovich Tyurin / M. Drapalyuk, A. Sivolapov, V. Bugakov, M. Razinkov // *Forestry Engineering Journal*. – 2023. – Vol. 12. – № 4. – P. 5-13. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/1>.

20. ElMasry, G. Recent Applications of Multispectral Imaging in Seed Phenotyping and Quality Monitoring—An Overview / G. ElMasry, N. Mandour, S. Al-Rejaie et al. // *Sensors*. – 2019. – Vol. 19. – № 5. – P. 1090. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s19051090>.
21. Esteve Agelet, L. Limitations and current applications of Near Infrared Spectroscopy for single seed analysis / L. Esteve Agelet, C.R. Hurburgh // *Talanta*. – 2014. – Vol. 121. – P. 288-299. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2013.12.038>.
22. Gallardo-Salazar, J.L. Seedling quality and survival of a true fir [*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham.] forest plantation from two provenances in central Mexico / J.L. Gallardo-Salazar, D.A. Rodríguez-Trejo, S. Castro-Zavala // *Agrociencia*. – 2019. – Vol. 53. – № 4. – P. 631-643.
23. Grossnickle, S. Seedling Quality: History, Application, and Plant Attributes / S. Grossnickle, J. MacDonald // *Forests*. – 2018. – Vol. 9. – № 5. – P. 283. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f9050283>.
24. Himanen, K. Seed quality attributes in seedling production of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) / K. Himanen // *Dissertationes Forestales*. – 2018. – Vol. 261. – P. 74. – DOI: <https://doi.org/10.14214/df.261>.
25. Hornberg, A. Handbook of machine vision / A. Hornberg. – Ladenburg : John Wiley & Sons, 2007. – 798 p.
26. Hu, J. Rapid evaluation of the quality of chestnuts using near-infrared reflectance spectroscopy / J. Hu, X. Ma, L. Liu et al. // *Food Chemistry*. – 2017. – Vol. 231. – P. 141-147. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.03.127>.
27. 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>.
28. Kang, K.-S. Seed orchards (Establishment, Management and Genetics) / K.-S. Kang, N. Bilir. – Ankara, Turkey : OGEM-VAK Press, 2021. – 1-189 p.
29. Keefe, R.F. Marked, biased, filter (MBF): use of digital X-radiography and mark-recapture to partition seed lots based on sampled individual seed quality attributes / R.F. Keefe, A.S. Davis // *New Forests*. – 2012. – Vol. 43. – № 2. – P. 169-184. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-011-9271-y>.
30. Khouja, M. Lipid Profile Quantification and Species Discrimination of Pine Seeds through NIR Spectroscopy: A Feasibility Study / M. Khouja, R.N.M.J. Páscoa, D. Melo et al. // *Foods*. – 2022. – Vol. 11. – № 23. – P. 3939. – DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11233939>.
31. Lamichhane, J.R. Abiotic and biotic factors affecting crop seed germination and seedling emergence: a conceptual framework / J.R. Lamichhane, P. Debaeke, C. Steinberg et al. // *Plant and Soil*. – 2018. – Vol. 432. – № 1-2. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3780-9>.
32. Lestander, T.A. NIR spectral information used to predict water content of pine seeds from multivariate calibration / T.A. Lestander, P. Geladi // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2005. – Vol. 35. – № 5. – P. 1139-1148. – DOI: <https://doi.org/10.1139/x05-046>.
33. Lestander, T.A. NIR spectroscopic measurement of moisture content in Scots pine seeds / T.A. Lestander, P. Geladi // *The Analyst*. – 2003. – Vol. 128. – № 4. – P. 389. – DOI: <https://doi.org/10.1039/b300234a>.
34. Li, H. Near-Infrared Spectroscopy Coupled Chemometric Algorithms for Rapid Origin Identification and Lipid Content Detection of *Pinus Koraiensis* Seeds / H. Li, D. Jiang, J. Cao, D. Zhang // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20. – № 17. – P. 4905. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s20174905>.
35. Mataruga, M. Monitoring and control of forest seedling quality in Europe / M. Mataruga, B. Cvjetković, B. De Cuyper et al. // *Forest Ecology and Management*. – 2023. – Vol. 546. – № August. – P. 121308. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121308>.
36. Mohan, M. UAV-supported forest regeneration: Current trends, challenges and implications / M. Mohan, G. Richardson, G. Gopan et al. // *Remote Sensing*. – 2021. – Vol. 13. – № 13. – DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13132596>.
37. Frontier technique of creating protective forests stands around nurseries on inefficient sites: technological foundations / V. Ivetić et al. // *Forestry Engineering Journal*. – 2022. – Vol. 12. – № 2. – P. 115-125. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/10>.

38. Detection of Scots pine single seed in optoelectronic system of mobile grader: mathematical modeling / M. Tigabu et al. // *Forests*. – 2021. – Vol. 12. – № 2. – P. 240. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f12020240>.
39. Novikov, A.I. About new means of forest seeds sorting in coniferous breeds [in Russian - O novykh sposobakh sortirovaniya lesnykh semyan khvoynykh porod] // *Forests of Eurasia in the third millennium: Proceedings of the international conference of young scientists*. – Moscow, Russian Federation, 2001. – P. 90-91. <https://elibrary.ru/rxiqj>.
40. Novikov, A.I. Improvement of technology for obtaining high-quality forest seed material : advanced Doctoral Thesis. – Voronezh State University of Forestry and Technologies, 2021. – 341 p. <https://elibrary.ru/jxtbsb>.
41. Novikov, A.I. Some technological features of the sorting devices and development trends // *Forest and youth VSAFE - 2000: proceedings of the anniversary scientific conference of young scientists dedicated to 70-th anniversary of VSAFE*. – Voronezh, Russian Federation, 2000. – P. 53-60. <https://elibrary.ru/snisit>.
42. 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>.
43. Mechanization of coniferous seeds grading in Russia: a selected literature analysis / B.T. Ersson 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>.
44. The effect of seed coat color grading on height of one-year-old container-grown Scots pine seedlings planted on post-fire site / V. Ivetić et al. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 226. – P. 012043. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012043>.
45. Scots pine seedlings growth dynamics data reveals properties for the future proof of seed coat color grading conjecture / V. Ivetić et al. // *Data*. – 2019. – Vol. 4. – № 3. – P. 106. – DOI: <https://doi.org/10.3390/data4030106>.
46. Dickson Quality Index: relation to technological impact on forest seeds / S. Rabko et al. // *Forestry Engineering Journal*. – 2023. – Vol. 13. – № 1. – P. 23-36. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/2>.
47. Performance of Scots pine seedlings from seeds graded by colour / M.V. Drapalyuk et al. // *Forests*. – 2019. – Vol. 10. – № 12. – P. 1064. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f10121064>.
48. Aerial seeding of forests in Russia: A selected literature analysis / B.T. Ersson et al. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 226. – № 1. – P. 012051. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012051>.
49. Novikova, T.P. Economic evaluation of mathematical methods application in the management systems of electronic component base development for forest machines / T.P. Novikova, A.I. Novikov // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 392. – № 1. – P. 012035. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/392/1/012035>.
50. Reforestation pipeline: case for quality management of NIR-region grading of Scots pine seeds and FLR-algorithm for information processing / E.P. Petrishchev et al. // *Silva Balcanica*. – 2023. – Vol. 24. – № 3. – DOI: <https://doi.org/10.3897/silvabalcanica.24.e114699>.
51. The Root Collar Diameter Growth Reveals a Strong Relationship with the Height Growth of Juvenile Scots Pine Trees from Seeds Differentiated by Spectrometric Feature / C.B. Mastrangelo et al. // *Forests*. – 2023. – Vol. 14. – № 6. – P. 1164. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f14061164>.
52. Ozbey, A. Block effect on genetic parameters in a 23-year-old progeny trial of *Pinus brutia* / A. Ozbey, N. Bilir // *Forestry Engineering Journal*. – 2022. – Vol. 12. – № 2. – P. 5-13. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/1>.
53. Royer-Tardif, S. Revisiting the Functional Zoning Concept under Climate Change to Expand the Portfolio of Adaptation Options / S. Royer-Tardif, J. Bauhus, F. Doyon et al. // *Forests*. – 2021. – Vol. 12. – № 3. – P. 273. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f12030273>.

54. Saha, R. Integrated assessment of adventitious rhizogenesis in Eucalyptus: root quality index and rooting dynamics / R. Saha, H.S. Ginwal, G. Chandra, S. Barthwal // *Journal of Forestry Research*. – 2020. – Vol. 31. – № 6. – P. 2145-2161. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-019-01040-6>.
55. Santos, C.C. Morphophysiology and quality of *Alibertia edulis* seedlings grown under light contrast and organic residue / C.C. Santos, A. Goelzer, O.B. da Silva et al. // *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. – 2023. – Vol. 27. – № 5. – P. 375-382. – DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v27n5p375-382>.
56. Sokolov, S. V. How to increase the analog-to-digital converter speed in optoelectronic systems of the seed quality rapid analyzer / S. V. Sokolov, V. V. Kamenskij, V. Ivetić // *Inventions*. – 2019. – Vol. 4. – № 4. – P. 61. – DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions4040061>.
57. Sokolov, S.V. New optoelectronic systems for express analysis of seeds in forestry production / S.V. Sokolov et al. // *Forestry Engineering Journal*. – 2019. – Vol. 9. – № 2. – P. 5-13. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.2/1>.
58. Tigabu, M. Characterization of forest tree seed quality with near infrared spectroscopy and multivariate analysis: PhD Thesis / M. Tigabu. – 2003. – 56 pp. + Papers I-VII p.
59. Tigabu, M. Multivariate discriminant analysis of single seed near infrared spectra for sorting dead-filled and viable seeds of three pine species: does one model fit all species? / M. Tigabu, A. Daneshvar, R. Jingjing et al. // *Forests*. – 2019. – Vol. 10. – № 6. – P. article id 469. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f10060469>.
60. Vale, A.M.P.G. A new automatic approach to seed image analysis: From acquisition to segmentation / A.M.P.G. Vale, M. Ucchesu, C. Di Ruberto et al. – 2020. – DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2012.06414>.
61. Wang, D. Single Wheat Kernel Color Classification by Using Near-Infrared Reflectance Spectra / D. Wang, F.E. Dowell, R.E. Lacey // *Cereal Chemistry*. – 1999. – Vol. 76. – № 1. – P. 30-33. – DOI: <https://doi.org/10.1094/CCHEM.1999.76.1.30>.
62. Wang, D. Single wheat kernel size effects on near-infrared reflectance spectra and color classification / D. Wang, F.E. Dowell, R.E. Lacey // *Cereal Chemistry*. – 1999. – Vol. 76. – № 1. – P. 34-37. – DOI: <https://doi.org/10.1094/CCHEM.1999.76.1.34>.
63. Yazici, N. Aspectual Fertility Variation and Its Effect on Gene Diversity of Seeds in Natural Stands of Taurus Cedar (*Cedrus libani* A. Rich.) / N. Yazici, N. Bilir // *International Journal of Genomics*. – 2017. – Vol. 2017. – P. 1-5. – DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/2960624>.
64. Zhao, F. Relationships between understory vegetation coverage and environmental factors in *Pinus massoniana* plantations from aerial seeding / F. Zhao, X.Z. Ouyang // *Chinese Journal of Applied Ecology*. – 2015. – Vol. 26. – № 4. – P. 1071-1076.

Приложение А. Фрагменты исходных данных для построения диаграммы иерархической кластеризации

Таблица А1

Степень влияния способов изучения спектрометрических свойств лесных семян (фрагмент датасета), встречающихся в источниках информации, используемых в исследовании по гранту РФФ 23-26-00228

Table A1

The degree of influence of methods for studying the spectrometric properties of forest seeds (dataset fragment) found in information sources used in the research under the RSF grant 23-26-00228

Краткое описание Geatoгенсточника информации	Код источника в списке литературы	Код страны (ISO)	Код метода	Код вида дерева	Вид электромагнитного излучения	Изучаемое свойство семени (или полученного из него сырья)	Идентифицируемый признак дифференциации семян	Код технического средства, содержащего источник электромагнитного излучения и (или) систему детектирования электромагнитного излучения	Критерии эффективности*							
									Критерий степени воздействия излучения на семена	Критерий организационных затрат на проведение исследования	Критерий инвазивности (0 – нет; 1 – да)	Критерий финансовых затрат	Критерий временных затрат	Критерий неиспользования в портативных устройствах	Критерий малой точности идентификации семени	Критерий малой возможности машинного обучения с использованием нейросетей
1. Khouja et al. (2023)	[30]	TN	9	1, 2, 3	FTIR	Липиды	Виды	1	1	3	1	3	3	3	1	2
2. Li et al. (2020)	[34]	CN	9	4	NIR-S	Липиды	Происхождение	2	1	2	0	2	3	2	1	2
3. Tigabu et al. (2019)	[59]	SE, CN	6, 9	5, 6, 7	NIR-E	Жизнеспособность	Десикация	3	1	2	1	3	3	3	1	2
4. Agelet et al. (2014)	[21]*	US	9	4	NIR-S NIT-S	Липиды, белок, влажность	NIR- или NIT-спектр	2	1	2	0	2	3	3	2	2
5. Novikova et al. (2023a)	[51]	RU	7	8	NIR-S VIS-S	Ранний рост   early growth	NIR- или VIS-спектр	4	1	2	0	3	1	2	2	1
6. Hu et al. (2017)	[26]	CN	9	9	FTIR	Водорастворимые сахара	Плесень   mildew	5	1	3	1	3	3	2	3	2
7. Novikov (2019)	[42]	RU	9	8	VIS-E	Жизнеспособность	VIS-спектр	6	1	1	0	2	2	1	2	1
8. Novikova et al. (2023b)	[50]	RU	9	8	NIR-S	Жизнеспособность	NIR-спектр	6	1	1	0	1	2	1	2	2
9. Lestander & Geladi (2003)	[33]	SE	9	8	NIR-E, NIT	Влажность	NIR   NIT спектр	7	1	2	0	2	2	2	1	2
10. Keefe & Davis (2012)	[29]	US	13, 15	10	X-Ray	Жизнеспособность	Плотность	8, 9	3	3	0	3	3	3	1	2
11. Vale et al. (2020)	[60]	IT, BR	7	11	VIS   RGB	Цвет	Сегментация	10	1	1	0	1	1	1	2	1

Краткое описание Featureисточника информации	Код источника в списке литературы	Код страны (ISO)	Код метода	Код вида дерева	Вид электромагнитного излучения	Изучаемое свойство семени (или полученного из него сянца)	Идентифицируемый признак дифференциации семян	Код технического средства, содержащего источник электромагнитного излучения и (или) систему детектирования электромагнитного излучения	Критерии эффективности*							
									Критерий степени воздействия излучения на семена	Критерий организационных затрат на проведение исследования	Критерий инвазивности (0 – нет, 1 – да)	Критерий финансовых затрат	Критерий временных затрат	Критерий неиспользования в портативных устройствах	Критерий малой точности идентификации семени	Критерий малой возможности машинного обучения с использованием нейросетей
12. Dell' Aquila (2009)	[16]*	IT	7	na	VIS   RGB	Всхожесть	Сегментация	–	1	2	0	1	1	2	2	2
13. Bernardes et al. (2022)	[12]	BR, RU	7	12	VIS   RGB	Зараженность	Сегментация	14	1	2	0	2	1	1	1	1
14. Lestander & Geladi (2005)	[32]	SE	6, 9	8	NIR-E	Влажность	Имбибиция	7	2	2	1	2	3	2	1	3
15. Beatriz et al. (2022)	[14]	BR	7	na	VIS   RGB	Всхожесть	Генотип	13	1	1	0	1	1	2	2	1
16. ElMasry et al. (2019)	[20]*	SA, EG	8	na	VIS   Hiper	Всхожесть	Фенотип	na	2	2	0	2	2	1	1	1

Примечание: 0 – не влияет; 1 – низкая; 2 – умеренная; 3 – высокая;

Note: 0 – does not affect; 1 – low; 2 – moderate; 3 – high;

Источник: систематический поиск автора Новиковой Т.П.

Source: systematic search for authors Novikova T.P.

Таблица A2

Фрагмент набора данных видов технических средств, содержащих источник электромагнитного излучения и (или) систему детектирования электромагнитного излучения для изучения свойств лесных семян, встречающихся в источниках информации, используемых в исследовании по гранту РФФИ 23-26-00228

Table A2

A fragment of a data set of types of technical means containing an electromagnetic radiation source and (or) an electromagnetic radiation detection system for studying the properties of forest seeds found in information sources used in research under the RSF grant 23-26-00228

Код технического средства, содержащего источник электромагнитного излучения и (или) систему детектирования электромагнитного излучения	Наименование технического средства на русском языке	Наименование технического средства на английском языке	Тип технического средства	Производитель	Код страны (ISO)
1	БИК-Фурье спектрометр	Fourier transform near infrared spectrometer	FTLA 2000	ABB	CA
2	БИК-спектрометр	Near infrared spectrometer	NIRQuest512	Ocean Optics, Inc.	US
3	ИК-Анализатор	Infrared analyzer	XDS Rapid Content Analyzer	FOSS NIRSystems, Inc.	DK
4	Фотосепаратор	Photo separator	Sapsan SE Mini	Smart Grade	RU

Код технического средства, содержащего источник электромагнитного излучения и (или) систему детектирования электромагнитного излучения	Наименование технического средства на русском языке	Наименование технического средства на английском языке	Тип технического средства	Производитель	Код страны (ISO)
5	БИК-Фурье спектрометр	Fourier transform near infrared spectrometer	ANTARIS	Thermo Nicolet	US
6	VIS-анализатор	VIS-spectrometer	USB 4000	Ocean Optics, Inc.	US
7	БИК-спектрометр	Near infrared spectrometer	NIRSystems 6500	Foss Analytical AB	SE
8	Планшетный сканер	Desktop scanner	HP Scanjet 3110	Hewlett-Packard Co	US
9	Рентгеновский аппарат	X-ray machine	Faxitron MX-20	Faxitron Corp.	US
10	Планшетный сканер	Flat-bed scanner	Epson Perfection V550	Epson Corp.	JP
11	Планшетный сканер	Flat-bed scanner	Sharp mod. JX-330	Sharp Corp.	JP
12	Планшетный сканер	Flat-bed scanner	HP ScanJet 6300C	Hewlett-Packard Co	US
13	Планшетный сканер	Flat-bed scanner	HP Scanjet 2004	Hewlett-Packard Co	US
14	Планшетный сканер	Flat-bed scanner	Epson Perfection V800	Epson Corp.	JP

### Сведения об авторах

*Новиков Артур Игоревич* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры древесиноведения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1230-0433>, e-mail: [arthur.novikov@vglta.vrn.ru](mailto:arthur.novikov@vglta.vrn.ru).

*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, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087; <http://orcid.org/0000-0003-1279-3960>, e-mail: [novikova\\_tp.vglta@mail.ru](mailto:novikova_tp.vglta@mail.ru).

✉ *Петрищев Евгений Петрович* – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1395-3631>, e-mail: [petrishchev.vgltu@mail.ru](mailto:petrishchev.vgltu@mail.ru).

### Information about the authors

*Arthur I. Novikov* – Dr Sci. (Tech.), professor, Chair of Wood Science, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1230-0433>, e-mail: [arthur.novikov@vglta.vrn.ru](mailto:arthur.novikov@vglta.vrn.ru).

*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).

✉ *Evgeniy P. Petrishchev* – Postgraduate Student (Tech.), Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1395-3631>, e-mail: [petrishchev.vgltu@mail.ru](mailto:petrishchev.vgltu@mail.ru).

✉ – Для контактов | Corresponding author