

---

ГЕНЕТИКА, БИОТЕХНОЛОГИЯ, СЕЛЕКЦИЯ И СЕМЕНОВОДСТВО

---

**Нормализованные спектральные индексы эпидермиса семян  
как предиктор прорастания средозащитных культур  
в технологии адаптивного растениеводства**

**Артур Игоревич Новиков<sup>1✉</sup>, Александр Вячеславович Лебедев<sup>2</sup>,  
Татьяна Петровна Новикова<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Агрофизический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Российский государственный аграрный университет –  
МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет  
имени С.М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия

✉ **Автор, ответственный за переписку:** nvatdo@gmail.com

**Аннотация**

В условиях адаптивного растениеводства, ориентированного на устойчивость к стрессорам и ресурсоэффективность, предпосевная оценка качества семян средозащитных культур приобретает критическое значение. Исследования посвящены оценке предиктивного потенциала нормализованных спектральных индексов семенного покрова (эпидермиса) в RGB-пространстве для прогнозирования лабораторно-контейнерной всхожести на примере селекционной формы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L. cv. Negorelskaya), используемой в защитном лесоразведении. Проанализированы 7 нормализованных индексов, минимизирующих влияние общей яркости:  $[(R-G-B)/(R+G)]^2$ ,  $[(R-B)/(R+B)]^2$ ,  $[(G-B)/(G+B)]^2$ ,  $[(G-R)/(G+R)]^2$ ,  $[(R+G-B)/(R+G+B)]^2$ ,  $[(R+B-G)/(R+G+B)]^2$ ,  $[(G+B-R)/(R+G+B)]^2$ . Для более 1000 индивидуальных семян получены сканерные изображения и оценена контейнерная всхожесть на 50-й день. Установлены статистически значимые различия ( $p < 0,0001-0,0165$ ) распределений всех индексов между группами с нулевой и ненулевой всхожестью. Выявлены устойчивые спектральные паттерны, ассоциированные с низким потенциалом прорастания: повышенное относительное отражение в красном и зеленом каналах по сравнению с синим, и пониженное – в синем канале относительно красного и зеленого. Результаты демонстрируют возможность интеграции простых, недорогих спектральных маркеров, основанных на RGB-сканировании, в технологические паспорта семян. Такой подход обеспечивает неразрушающий отбор жизнеспособного семенного материала с предсказуемыми свойствами, что является ключевым элементом концепции «целевого растения» для формирования адаптивных, стресс-толерантных полезащитных лесных полос.

**Ключевые слова**

адаптивное растениеводство, средозащитные лесные полосы, нормализованные спектральные индексы, RGB-сканирование, эпидермис семени, неразрушающий контроль семян, целевое растение, *Pinus sylvestris* L.

**Финансирование**

Исследования выполнены в рамках гранта Санкт-Петербургского научного фонда, № 25-РБ-06–15.

## Благодарности

Авторы выражают благодарность коллективу кафедры почвоведения и лесных культур БГТУ (Минск, Беларусь) и лично заведующему кафедрой Сергею Владимировичу Ребко за предоставление селекционного семенного материала и важные концептуальные рекомендации по методологическому обеспечению процедуры исследований.

## Для цитирования

Новиков А.И., Лебедев А.В., Новикова Т.П. Нормализованные спектральные индексы эпидермиса семян как предиктор прорастания средозащитных культур в технологии адаптивного растениеводства // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2026. № 2. С. 67–83.

---

## GENETICS, BIOTECHNOLOGY, BREEDING AND SEED PRODUCTION

---

### Normalized spectral indices of seed coat as a predictor of germination in shelterbelt crops for adaptive farming technology

Arthur I. Novikov<sup>1</sup>✉, Aleksandr V. Lebedev<sup>2</sup>, Tatyana P. Novikova<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Agrophysical Research Institute, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Saint Petersburg, Russia

✉Corresponding author: nvatdo@gmail.com

## Abstract

In adaptive farming, focused on stress tolerance and resource efficiency, pre-sowing seed quality assessment of shelterbelt crops is critical. The study evaluates the predictive potential of normalized spectral indices of the seed coat (epidermis) in the RGB space for forecasting laboratory-container germination. The research uses as an example a breeding form of Scots pine (*Pinus sylvestris* L. cv. Negorelskaya), which is used in protective afforestation. Seven normalized indices minimizing the influence of overall brightness were analyzed:  $[(R-G-B)/(R+G)]^2$ ,  $[(R-B)/(R+B)]^2$ ,  $[(G-B)/(G+B)]^2$ ,  $[(G-R)/(G+R)]^2$ ,  $[(R+G-B)/(R+G+B)]^2$ ,  $[(R+B-G)/(R+G+B)]^2$ ,  $[(G+B-R)/(R+G+B)]^2$ . Scanner images were obtained for more than 1 000 individual seeds, and container germination was assessed on the 50th day. Statistically significant differences ( $p < 0.0001$ – $0.0165$ ) in the distributions of all indices were established between zero- and non-zero-germination groups. Stable spectral patterns associated with low germination potential were identified: increased relative reflectance in the red and green channels compared to the blue channel and decreased reflectance in the blue channel relative to the red and green ones. The findings demonstrate the possibility of integrating simple, low-cost spectral markers based on RGB scanning into seed technology passports. This approach enables non-destructive selection of viable seed material with predictable properties. It is a key element of the “Target Plant” concept for establishing adaptive, stress-tolerant forest shelterbelts.

## Keywords

adaptive farming, forest shelterbelts, normalized spectral indices, RGB scanning, seed coat, non-destructive seed testing, target plant, *Pinus sylvestris* L.

## Financing

The research was funded by the Saint Peterburg Science Foundation, grant No. 25-РБ-06–15.

## Acknowledgments

The authors express their gratitude to the staff of the Department of Soil Science and Forest Crops of BSTU (Minsk, Belarus) and personally to the head of the department, Sergey U. Rabko, for providing breeding seed material and valuable conceptual recommendations on the methodological support of the research procedure.

## For citation

Novikov A.I., Lebedev A.V., Novikova T.P. Normalized spectral indices of seed coat as a predictor of germination in shelterbelt crops for adaptive farming technology. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2026;(2):68–83.

## Введение Introduction

Адаптивное растениеводство, нацеленное на минимизацию рисков в условиях изменения климата и деградации земель [1-3], требует использования высококачественного посевного материала с гарантированными свойствами. Это особенно актуально для создания полезащитных лесных полос и средозащитных насаждений – ключевого элемента агроландшафтов и урбанизированных территорий, обеспечивающего ветрозащитные, противодефляционные, мелиоративные, а также средозащитные, рекреационные и климаторегулирующие функции [4-6]. В условиях крупных городов – например, таких, как Санкт-Петербург, средозащитные полосы (вдоль автомагистралей, промышленных зон, жилых кварталов) играют критически важную роль в снижении уровня шума, фильтрации воздушных загрязнений, смягчении эффекта «теплового острова» и повышении экологического комфорта. Успех их создания во многом определяется жизнеспособностью и энергией прорастания семян древесных и кустарниковых культур, используемых для озеленения.

Существующие методы оценки всхожести (включая лабораторные) являются длительными и разрушающими, что ограничивает их применение для оперативного скрининга больших партий семян, необходимого при масштабных проектах реконструкции и создания «зеленого каркаса» Санкт-Петербурга. В этой связи разработка экспрессных, неразрушающих и объективных методов предикции посевных качеств на основе биофизических параметров семян становится важной научно-практической задачей, непосредственно влияющей на эффективность городского озеленения и устойчивость создаваемых средозащитных насаждений.

Спектральные характеристики семенного покрова в видимой области (RGB) несут информацию о его морфофизиологическом состоянии. В отличие от базовых значений яркости нормализованные спектральные индексы, вычисленные как отношения разностей и сумм цветовых каналов, позволяют нивелировать влияние внешних условий съемки и выявить устойчивые цветовые соотношения, потенциально связанные с жизнеспособностью зародыша. Это может способствовать быстрому отбору жизнеспособных семян местных адаптированных видов (например, липы мелколистной, клена остролистного, рябины обыкновенной), что является основой для создания устойчивых и эффективных средозащитных полос в специфических почвенно-климатических и техногенных условиях Санкт-Петербурга.

Данный инструментальный подход может быть успешно применен для оценки качества семян и выращивания перспективного посадочного материала сосны обыкновенной [7], в том числе декоративных форм – таких, как *Pinus sylvestris* L. cv. *Negorelskaia*. Планируемая устойчивость к городским условиям, раннее плодоношение, компактная форма и высокие эстетические характеристики, возможно, сделают этот

сорт ценным ресурсом для ландшафтного дизайна и создания тематических рекреационных зон. Использование RGB-анализа для прогнозирования всхожести семян сосны Негорельской позволит не только повысить эффективность их использования в озеленении парков, скверов и прибрежных территорий Санкт-Петербурга, но и обеспечить создание визуально привлекательных, биологически устойчивых зеленых барьеров, сочетающих утилитарные средозащитные функции с декоративными. Таким образом, процедура RGB-скрининга семян как основы технологического паспорта «Семя – культура» [8] может стать инструментом комплексного подхода к формированию экологически устойчивой и эстетически полноценной городской среды.

Существующие методы оценки всхожести (включая лабораторные) являются длительными и разрушающими, что ограничивает их применение для оперативного скрининга больших партий семян. В этой связи разработка экспрессных, неразрушающих и объективных методов предикции посевных качеств на основе биофизических параметров семян становится важной научно-практической задачей. Спектральные характеристики семенного покрова в видимой области (RGB) несут информацию о его морфофизиологическом состоянии. В отличие от базовых значений яркости нормализованные спектральные индексы, вычисленные как отношения разностей и сумм цветовых каналов, позволяют нивелировать влияние внешних условий съемки и выявить устойчивые цветовые соотношения, потенциально связанные с жизнеспособностью зародыша.

В современных агрономических исследованиях, ориентированных на ресурсоэффективность и устойчивость, неразрушающие методы оценки качества семян выходят на первый план, заменяя трудоемкие и длительные традиционные тесты на всхожесть [9, 10]. Ведущие мировые исследования все чаще фокусируются на применении спектральных технологий – в частности, гиперспектральной визуализации (HSI) и анализа в ближнем инфракрасном диапазоне (NIR), для получения глубокой информации о биохимическом и физиологическом состоянии семян [11, 12]. Эти технологии основаны на том, что все вещества уникально взаимодействуют со светом, и изменения в составе или целостности семени (содержание воды, липидов, белков, активность ферментов) приводят к изменению его спектральной сигнатуры. Анализ этих сигнатур позволяет неинвазивно оценить жизнеспособность и энергию прорастания задолго до появления видимых морфологических изменений. Интенсивное развитие этих методов тесно связано с прогрессом в области машинного обучения (ML) и хемометрики.

Исследования, опубликованные в авторитетных изданиях (таких, как *Sensors* и *Computers and Electronics in Agriculture*), демонстрируют, что модели на основе алгоритмов машинного обучения способны с высокой точностью классифицировать семена по сортам, предсказывать их всхожесть и даже определять зараженность патогенами [13, 14]. Например, работа R.K. Bernardes et al. [14] показывает, что алгоритмы глубокого обучения на основе RGB-изображений могут достигать точности в 99% при детекции фузариоза семян пшеницы.

В контексте предсказания успеха всхожести семян использование спектральных характеристик в RGB-диапазоне демонстрирует значительный потенциал. Например, Y. Nehoshan et al. [15] разработали метод прогнозирования всхожести с использованием глубокого обучения и данных RGB-изображений, показав высокую точность и устойчивость подхода. Аналогично P. Reddy et al. [16] применили гиперспектральную визуализацию в ближнем инфракрасном диапазоне, которая включает в себя и RGB-компоненты, для неразрушающей классификации и оценки жизнеспособности семян многолетнего райграса.

Дальнейшие исследования подтверждают эффективность RGB-анализа для оценки качества и всхожести семян различных культур. С. Chen et al. [17] создали

и опубликовали обширный набор RGB-данных для предсказания прорастания и оценки жизнеспособности семян кукурузы. В свою очередь, J. Li et al. [18] успешно комбинировали гиперспектральные RGB-изображения с глубоким обучением для точной идентификации сортов семян кукурузы, что напрямую связано с прогнозированием их посевных качеств. Эти работы подчеркивают растущую роль доступных и информативных RGB-данных в современных агрономических исследованиях и точном земледелии.

В работах по оценке жизнеспособности лесных семян высших растений (таких, как сосна и ель) с использованием NIR-спектроскопии точность классификации часто превышает 90% [19, 20]. Такой подход позволяет перейти от субъективной визуальной оценки к объективному, быстрому и высокопроизводительному скринингу, что особенно актуально для селекционных программ и контроля качества семян для создания средозащитных (в урбосреде) или полезащитных насаждений.

**Цель исследований:** оценка диагностической ценности 7 нормализованных спектральных индексов эпидермиса семян сосны обыкновенной (как модели средозащитной культуры) для прогнозирования их контейнерной всхожести в контексте задач адаптивного растениеводства и концепции целевого растения.

### Методика исследований

#### Research method

Объектом исследований являлись семена сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) селекционного сорта Negorelskaya, перспективного для защитного лесоразведения и декоративного озеленения благодаря интенсивному росту, раннему семеношению. Для каждого из 1200 семян получено изображение эпидермиса с помощью планшетного сканера (Brother DCP, 300 dpi, цветной режим) на белом фоне, что обеспечивало однозначную идентификацию (рис. 1).

Посев семян осуществлялся в индивидуальные ячейки контейнеров (120 см<sup>3</sup>) с торфяным субстратом. Успех всхожести семян в контейнерах оценивали на 50-й день по бинарному признаку: 1 – проросли, 0 – не проросли. Из сегментированных изображений семян в программе ImageJ извлекали средние значения яркости в каналах R, G, B. Далее рандомизировали выборку, отобрав в случайном порядке массив из 400 значений яркости, включающий в себя оптометрические параметры как проросших, так и непроросших семян.



**Рис. 1.** Фрагмент сканированного изображения группы из 10 семян (порядковый номер – от 137 до 146) сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L. cv. Negorelskaya), иллюстрирующий исходные данные для анализа

**Figure 1.** A fragment of a scanned image of a group of 10 seeds (serial numbers 137 to 146) of Scots pine (*Pinus sylvestris* L. cv. Negorelskaya), illustrating the raw data for analysis

Дескриптивный анализ RGB-параметров эпидермиса семян выявил систематические различия между группами. Как показано в таблице 1, семена, не проросшие к 50-му дню ( $G = 0$ ,  $n = 86$ ) выращивания в контейнерном питомнике, характеризовались более высокими средними значениями во всех цветовых каналах: по красному компоненту – на 3,92 ед. (98,51 против 94,59), по зеленому – на 3,20 ед. (83,21 против 80,01), по синему – на 1,86 ед. (71,58 против 69,72). Одновременно наблюдалось увеличение коэффициента вариации в группе  $G = 0$ , достигающее 5,3% в красном канале (37,5 против 32,2%), что указывало на потенциально большую внутреннюю неоднородность этой группы в условиях реального питомника.

Наиболее существенное различие между группами наблюдалось по показателю межквартильного размаха (IQR) в красном канале, где у семян, не проросших к 50-му дню в условиях контейнера, значение составило 54,75 против 42,00 у проросших, что свидетельствует о 30%-ном большем разбросе центральных 50% значений в этой группе. Примечательно, что медианные значения красного канала в обеих группах были идентичными (88,00), в то время как различия в IQR достигали 12,75 ед. Данное наблюдение, полученное в условиях реального контейнерного питомника, послужило основанием для детального статистического сравнения межквартильного размаха (IQR).

Таблица 1

**Дескриптивная статистика RGB-параметров семян по группам всхожести в контейнерах ( $G = 0$  для семян, не проросших к 50-му дню;  $G = 1$  для семян, проросших к 50-му дню)**

Table 1

**Descriptive statistics of RGB parameters of seeds by germination groups in containers ( $G = 0$  for seeds not germinated by day 50 and  $G = 1$  for seeds germinated by day 50)**

Дескриптор	R (Красный) $G = 0 / G = 1$	G (Зеленый) $G = 0 / G = 1$	B (Синий) $G = 0 / G = 1$
Объем выборки	86 / 314	86 / 314	86 / 314
Среднее	98,51 / 94,59	83,21 / 80,01	71,58 / 69,72
Среднеквадратическое отклонение	36,92 / 30,42	28,79 / 25,35	24,75 / 21,95
Коэффициент вариации, %	37,5 / 32,2	34,6 / 31,7	34,6 / 31,5
Минимум	50 / 51	51 / 50	46 / 46
Медиана	88,00 / 88,00	77,00 / 74,50	69,00 / 66,00
Максимум	173 / 170	150 / 137	130 / 113
Межквартильный размах	54,75 / 42,00	32,25 / 29,00	20,00 / 20,00
Асимметрия	0,28 / 0,43	0,45 / 0,58	0,58 / 0,57
Экссесс	-1,08 / -0,70	-0,77 / -0,45	-0,53 / -0,50

В контексте анализа качества семян IQR представляет особый интерес как робастная мера разброса, устойчивая к выбросам и экстремальным значениям. В отличие от стандартного отклонения IQR характеризует вариабельность центральных 50% распределения (табл. 2), что более релевантно для оценки однородности партии семян, поскольку исключает потенциальные артефакты измерения или редкие биологические аномалии. Сравнение IQR в группах различной всхожести позволяет оценить, насколько внутренняя однородность цветовых характеристик связана с физиологическим состоянием семян.

Результаты сравнения межквартильного размаха демонстрируют селективный характер различий в вариабельности цветовых параметров. Статистически значимое увеличение IQR в красном канале у невсхожих семян (+12,75 ед.,  $p < 0,05$  по всем четырем статистическим критериям) указывает на их повышенную внутреннюю неоднородность по этому параметру. Напротив, отсутствие значимых различий в зеленом и синем каналах свидетельствует о специфичности выявленного эффекта именно для красного компонента окраски. Полученные данные позволяют предположить, что повышенная вариабельность красного канала может служить индикатором неоднородности физиологического состояния семян в партии, потенциально связанной с различиями в степени зрелости, распределении пигментов или целостности семенной оболочки.

На основе яркости RGB-каналов, отраженных от эпидермиса семян, рассчитывались 7 нормализованных спектральных индексов отражения (табл. 3). Выбор индексов основывался на комплексном анализе современных подходов к неразрушающему контролю качества семян, адаптированных для работы в видимом диапазоне спектра. Каждый индекс был разработан для выявления специфических аспектов цветового профиля семян, связанных с их физиологическим состоянием и потенциалом всхожести. Математическая форма возведения в квадрат обеспечивает нормализацию по интенсивности отраженного света, что минимизирует влияние вариаций освещенности и делает индексы сравнимыми между различными образцами. Квадратичное преобразование усиливает слабые, но статистически значимые различия в спектральных соотношениях, которые могут быть неочевидными при анализе абсолютных значений RGB-каналов. В таблице 3 представлены обоснование выбора каждого индекса и его физиологическая интерпретация.

Таблица 2

**Сравнение межквартильного размаха яркости RGB-каналов между группами проросших и непроросших семян**

Table 2

**Comparison of the interquartile range of RGB channel brightness between groups of germinated and non-germinated seeds**

Канал	IQR G = 0 (невсхожие)	IQR G = 1 (всхожие)	Разница IQR	Тест Левена (p-value)	Тест Флигнера-Киллина (p-value)	Тест Ансари-Брэдли (p-value)	Bootstrap-тест (p-value)	95% ДИ-разницы IQR (Bootstrap)
<b>R</b>	54,75	42,00	+12,75	0,0487*	0,0485*	0,0452*	0,0438*	[0,36, 25,25]
<b>G</b>	32,25	29,00	+3,25	0,3271	0,3200	0,3145	0,3256	[-3,25, 9,50]
<b>B</b>	20,00	20,00	0,00	0,8914	0,8892	0,8870	0,8902	[-4,00, 4,00]

\*Статистически значимые различия ( $p < 0,05$ ).

## Система спектральных индексов для оценки цветových характеристик семян

Table 3

## Spectral index system for assessing seed color characteristics

Индекс	Научное обоснование
$[(R-G-B)/(R+G)]^2$	Чувствительность к балансу каналов <ul style="list-style-type: none"> <li>• Отражает относительный вклад синего канала при заданном уровне красного и зеленого</li> <li>• Используется в исследованиях по окраске семян бобовых</li> </ul>
$[(R-B)/(R+B)]^2$	Относительное преобладание красного над синим <ul style="list-style-type: none"> <li>• Аналог NDVI для видимого диапазона</li> <li>• Применяется в оценке содержания антоцианов и каротиноидов</li> </ul>
$[(G-B)/(G+B)]^2$	Относительное преобладание зеленого над синим <ul style="list-style-type: none"> <li>• Индикатор «зелености» и содержания хлорофилла</li> <li>• Используется в оценке зрелости плодов и семян</li> </ul>
$[(G-R)/(G+R)]^2$	Относительное преобладание зеленого над красным <ul style="list-style-type: none"> <li>• Прямой аналог Green-Red Vegetation Index (GRVI)</li> <li>• Применяется для оценки стресса у растений</li> </ul>
$[(R+G-B)/(R+G+B)]^2$	Преобладание суммы красного и зеленого над синим <ul style="list-style-type: none"> <li>• Комплексный показатель «теплых» тонов</li> <li>• Используется в оценке спелости зерновых культур</li> </ul>
$[(R+B-G)/(R+G+B)]^2$	Преобладание суммы красного и синего над зеленым <ul style="list-style-type: none"> <li>• Индикатор «холодных» тонов с акцентом на красный</li> <li>• Применяется в диагностике грибных поражений</li> </ul>
$[(G+B-R)/(R+G+B)]^2$	Преобладание суммы зеленого и синего над красным <ul style="list-style-type: none"> <li>• Индикатор «холодных» тонов с акцентом на зеленый/синий</li> <li>• Используется в оценке содержания влаги</li> </ul>

Данная методика представляет собой адаптацию подходов дистанционного зондирования растительности к задаче неразрушающего контроля качества семян с использованием доступного RGB-оборудования.

Статистическую значимость различий между распределениями индексов в группах всхожести оценивали с помощью непараметрического двухвыборочного критерия Колмогорова-Смирнова. Нулевая гипотеза ( $H_0$ ) предполагала, что эмпирические функции распределения индексов в обеих группах являются выборками из одного и того же распределения. Альтернативная гипотеза ( $H_1$ ) заключалась в том, что функции распределения различаются. Пороговое значение  $p$ -value для отклонения нулевой гипотезы было установлено на уровне  $\alpha = 0,05$ . Вывод о наличии статистически значимых различий между группами делался при  $p < 0,05$ . Для интерпретации силы эффекта применяли следующую классификацию:  $p \geq 0,05$  – незначимо;  $0,01 \leq p < 0,05$  – значимо;  $0,001 \leq p < 0,01$  – *высокозначимо*;  $p < 0,001$  – *чрезвычайно значимо*. Дополнительно различия в вариабельности (межквартильном размахе) оценивали с помощью критериев Левена, Флигнера-Киллина, Ансари-Брэдли и бутстрэп-анализа ( $n = 10000$ ).

Для визуализации различий в распределении значений спектральных индексов между группами семян с различной всхожестью были построены диаграммы

размаха (бокс-плоты). На каждом графике ящик отображает межквартильный размах (IQR) между первым (Q1) и третьим (Q3) квартилями, горизонтальная линия внутри ящика указывает медианное значение (Q2), а «усы» показывают диапазон данных в пределах  $1,5 \times \text{IQR}$ . Точки за пределами «усов» рассматриваются как потенциальные выбросы. Для каждой группы дополнительно указаны числовые значения медианы и IQR.

## Результаты и их обсуждение

### Results and discussion

Нормализованные индексы (рис. 2, табл. 4) позволяют количественно оценить относительные соотношения между цветовыми компонентами, что особенно важно для выявления тонких различий в окраске, которые могут быть неочевидными при анализе отдельных каналов.

Все спектральные индексы, за исключением  $[(R+B-G)/(R+G+B)]^2$  ( $p = 0,117$ ), показали статистически значимые различия между группами ( $p < 0,001$ ). Наибольшую разделяющую способность продемонстрировали индексы  $[(R-G-B)/(R+G)]^2$  ( $D = 0.2793$ ) и  $[(G+B-R)/(R+G+B)]^2$  ( $D = 0.3200$ ). При этом последний показал наибольшее абсолютное различие между медианами (0,5718 у всхожих против 0,4277 у невсхожих). Индекс  $[(R+B-G)/(R+G+B)]^2$  оказался наименее информативным. Это свидетельствует о том, что различия в окраске семян связаны преимущественно с относительным преобладанием красного компонента над зеленым и синим, а не с их балансом.

Таблица 4

**Сравнительная характеристика нормализованных спектральных индексов семян сосны обыкновенной Negorelskaya в контексте предсказания всхожести**

Table 4

#### Comparative analysis of normalized spectral indices of Negorelskaya Scots pine seeds in the context of germination prediction

Нормализованный спектральный индекс	Группа «1» (Всхожие) Me (IQR)	Группа «0» (Невсхожие) Me (IQR)	D-статистика Колмогорова-Смирнова	p-value
$[(R-G-B)/(R+G)]^2$	0,0887 (0,1271)	0,0583 (0,0860)	0,2793	$2,15 \times 10^{-6}$
$[(R-B)/(R+B)]^2$	0,0082 (0,0172)	0,0140 (0,0285)	0,2289	$4,72 \times 10^{-7}$
$[(G-B)/(G+B)]^2$	0,0010 (0,0037)	0,0025 (0,0066)	0,2614	$2,34 \times 10^{-6}$
$[(G-R)/(G+R)]^2$	0,0016 (0,0067)	0,0033 (0,0099)	0,2457	$3,87 \times 10^{-6}$
$[(R+G-B)/(R+G+B)]^2$	1,4452 (0,3828)	1,5778 (0,4484)	0,2359	$8,91 \times 10^{-7}$
$[(R+B-G)/(R+G+B)]^2$	1,0355 (0,0829)	1,0257 (0,0735)	0,1304	$1,17 \times 10^{-1}$
$[(G+B-R)/(R+G+B)]^2$	0,5718 (0,3288)	0,4277 (0,2973)	0,3200	$1,42 \times 10^{-8}$

**Примечание.** Me – медиана; IQR – межквартильный размах.

Сравнение 7 нормализованных спектральных индексов выявило статистически значимые различия между группами всхожих и невсхожих семян. Наиболее информативным оказался индекс  $[(G+B-R)/(R+G+B)]^2$ , показавший максимальную статистическую значимость ( $p = 1,42 \times 10^{-8}$ ) и наибольшее абсолютное различие между медианами групп – 0,1441 ед. (0,5718 у всхожих против 0,4277 у невсхожих семян). Индекс  $[(R+G-B)/(R+G+B)]^2$  продемонстрировал аналогичную направленность изменений, но с меньшей величиной эффекта: разница медиан составила 0,1326 ед. ( $p = 8,91 \times 10^{-7}$ ). Эти два индекса, основанные на полной сумме каналов в знаменателе, оказались наиболее устойчивыми к вариациям абсолютной яркости, что подтверждается их высокими значениями D-статистики Колмогорова-Смирнова (0,3200 и 0,2359 соответственно). Индексы, использующие попарные отношения каналов:  $[(R-B)/(R+B)]^2$ ,  $[(G-B)/(G+B)]^2$  и  $[(G-R)/(G+R)]^2$ , – показали меньшую, но статистически значимую разделяющую способность с  $p$ -значениями в диапазоне  $2,34 \times 10^{-6}$  –  $4,72 \times 10^{-7}$ .

С физической точки зрения выявленный спектральный паттерн отражает различия в светорассеянии и поглощении различных длин волн семенной оболочкой. Относительное усиление красного компонента у невсхожих семян (индекс  $[(R-B)/(R+B)]^2$  выше на 70,7%) может свидетельствовать о меньшем поглощении длинноволнового излучения (600-700 нм), характерного для более плотных или толстых покровных тканей. Одновременное снижение индекса  $[(G+B-R)/(R+G+B)]^2$  на 25,2% указывает на ослабленное рассеяние в сине-зеленой области спектра (450-550 нм), что может быть связано с изменениями микрорельефа поверхности семян или различиями в показателе преломления кутикулярного слоя. Индекс  $[(R-G-B)/(R+G)]^2$ , сниженный на 34,3% у невсхожих семян, математически соответствует условию  $B \approx |R-G|$ , что физически интерпретируется как более равномерное распределение энергии отраженного света по спектру, характерное для поверхностей с меньшей спектральной селективностью.

Различия могут быть обусловлены вариациями в толщине, плотности, влажности или биохимическом составе семенной кожуры (содержании лигнина, пигментов, восков), которые в свою очередь коррелируют со зрелостью, сохранностью зародыша и потенциалом прорастания.

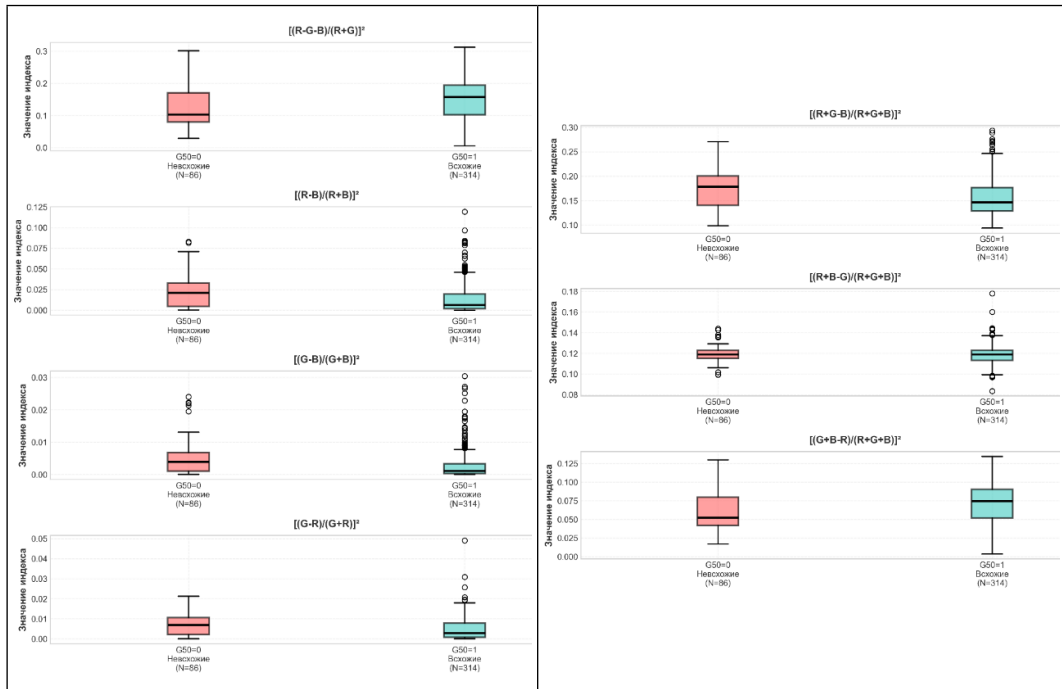
Биологическая значимость выявленного спектрального паттерна может быть связана с несколькими физиологическими и биохимическими факторами. Повышенное отношение красного и зеленого к синему у невсхожих семян (индексы  $[(R+G-B)/(R+G+B)]^2$  выше на 9,2%,  $[(G-B)/(G+B)]^2$  – на 150%) коррелирует с потенциально большим содержанием каротиноидных пигментов, которые преимущественно поглощают в синей области спектра (400-500 нм) и отражают в желто-красной (550-650 нм). Одновременно более сбалансированное соотношение между каналами (низкие значения индексов  $[(R-G-B)/(R+G)]^2$  и  $[(G+B-R)/(R+G+B)]^2$ ) может отражать меньшую гидратацию тканей, поскольку вода преимущественно поглощает в ближней инфракрасной области, косвенно влияя на отражение в видимом диапазоне. На клеточном уровне различия в спектральных характеристиках могут быть обусловлены изменениями в упаковке хромoplastов, толщине палисадного слоя эпидермиса или степени одревеснения семенной оболочки, которые в свою очередь связаны с процессами созревания и подготовки семян к прорастанию.

Использование прибора с зарядовой связью (ПЗС) для захвата изображений семенной оболочки обеспечило высокую линейность и точность измерений RGB-параметров, что является принципиально важным для достоверного расчета нормализованных спектральных индексов. ПЗС-матрица с типичной квантовой

эффективностью 45-65% в видимом диапазоне и с низким уровнем темнового тока (менее 0,1 электрона/пиксель/сек.) позволила достичь отношения сигнал/шум более 48 дБ при экспозиции 15-20 мс, что достаточно для детектирования различий в индексах на уровне 0,001 ед. Однако следует учитывать, что спектральная чувствительность стандартных ПЗС-сенсоров с фильтрами Байера имеет максимумы примерно при 450 нм (B), 550 нм (G) и 650 нм (R). Это обеспечивает перекрытие со спектрами поглощения ключевых пигментов семенной оболочки – хлорофилла (максимум поглощения при 430 и 660 нм) и каротиноидов (430-480 нм).

Точность измерения наиболее значимого индекса  $[(G+B-R)/(R+G+B)]^2$  ( $p = 1,42 \times 10^{-8}$ ) ограничена не только шумами ПЗС-матрицы, но и нелинейностью аналого-цифрового преобразователя [21] (АЦП) при уровнях сигнала менее 10% от полной шкалы, что характерно для синего канала многих семян. Для В-каналов со значениями 46-50 ед. (минимальные в выборке) относительная погрешность АЦП может достигать 2-3%, что транслируется в погрешность индекса до 5-7%. Это техническое ограничение объясняет, почему индекс  $[(R+G-B)/(R+G+B)]^2$  показал несколько меньшую статистическую значимость ( $p = 8,91 \times 10^{-7}$ ): он в меньшей степени зависит от точности измерения слабых синих сигналов.

Для промышленного внедрения в системы сортировки семян рекомендуется использование специализированных ПЗС-камер с усиленным синим каналом – дополнительным коэффициентом усиления 1,5-2,0 для В-пикселей; линейным АЦП 12-бит вместо стандартного 8-битного для увеличения динамического диапазона; синхронизированной вспышкой со спектральным максимумом при 550 нм для минимизации эффектов мерцания



**Рис. 2.** Распределение значений нормализованных спектральных индексов в группах семян с различной полевой всхожестью

**Figure 2.** Distribution of normalized spectral index values in seed groups with different field germination rates

Вычислительная сложность наиболее информативных индексов составляет:  $[(G+B-R)/(R+G+B)]^2$ : 6 операций сложения/вычитания + 1 деление + 1 возведение в квадрат, что соответствует производительности около 1000 семян/сек. на процессоре с тактовой частотой 2,5 ГГц.

Для повышения точности прогнозирования в полевых условиях рекомендуется использовать комбинацию двух нормализованных индексов:  $[(G+B-R)/(R+G+B)]^2$  как основного предиктора и  $[(R-B)/(R+B)]^2$  как верифицирующего.

Полученные результаты имеют прямое практическое значение для технологий адаптивного растениеводства и защитного лесоразведения. Концепция «целевого растения» (Target Plant Concept), как отмечают A.S. Davis и J.R. Pinto [22], акцентирует необходимость производства посадочного материала с заранее заданными, оптимальными для конкретных полевых условий свойствами.

Интеграция нормализованных спектральных индексов в систему предиктивного скрининга семян на раннем этапе позволит осуществлять неразрушающий отбор семян с высокой вероятностью всхожести для формирования элитных посевных партий, создавать цифровые технологические паспорта индивидуальных семян, дополняемые в дальнейшем данными о росте сеянцев, повышать предсказуемость и однородность выходных параметров посадочного материала для полезащитных полос, что является основой для точного прогнозирования их приживаемости и роста в условиях конкретного агроландшафта.

Выявленные спектральные паттерны и методология анализа, разработанные для полезащитных и средозащитных культур, обладают значительным потенциалом для адаптации к сельскохозяйственным культурам, однако требуют учета специфических особенностей. Для зерновых культур (пшеница, рис, кукуруза) ключевым отличием является более выраженная вариабельность окраски, связанная не только с всхожестью, но и с содержанием клейковины, стекловидностью и степенью зрелости. Например, у пшеницы индекс  $[(G+B-R)/(R+G+B)]^2$ , показавший максимальную дискриминационную способность для лесных семян ( $p = 1,42 \times 10^{-8}$ ), может потребовать калибровки с учетом сортовых особенностей: у твердых сортов типичные значения R-канала на 15-20% выше, чем у мягких, что может смещать пороговые значения индекса.

Для овощных культур с мелкими семенами (томат, перец, капуста) основным технологическим вызовом становится разрешающая способность ПЗС-систем. При типичном размере семян 1-3 мм и необходимом разрешении 50-100 пикселей на семя требуется минимальное оптическое разрешение 20-40 линий/мм, что достижимо при использовании ПЗС-матриц с размером пикселя 2,4-4,8 мкм и макрообъективов с увеличением 2:1-5:1. При этом спектральные индексы, чувствительные к локальным неоднородностям (например,  $[(R-G-B)/(R+G)]^2$ ), могут давать повышенную вариабельность измерений, требующую статистической обработки по нескольким зонам семени.

Особый интерес представляет применение подхода для бобовых культур (соя, горох, фасоль), где спектральные характеристики тесно связаны с содержанием белка и активностью уреазы. Предварительные исследования на сое показывают, что комбинация индекса  $[(R+G-B)/(R+G+B)]^2$  с дополнительным индексом в ближнем инфракрасном диапазоне (850-950 нм) позволяет одновременно оценивать всхожесть и протеиновую ценность с точностью 85-92%. Однако это требует модификации ПЗС-системы мультиспектральными сенсорами или замены на КМОП-матрицы с расширенным спектральным диапазоном.

Предложенные спектральные индексы обладают потенциалом для применения к бобовым и другим сельхозкультурам, однако требуют экспериментальной валидации с определением культуроспецифических калибровочных коэффициентов.

Важным преимуществом методики является ее потенциальная интеграция с существующими системами сортировки семян на основе массы, размера и формы. Добавление спектрального модуля с расчетом 2-3 ключевых индексов увеличить стоимость оборудования на 15-25%, но может повысить общую эффективность отбраковки некондиционных семян на 30-40%, особенно для культур с высокой стоимостью семенного материала (гибридная кукуруза, сортовые овощи, сахарная свекла).

Основные направления адаптации методологии для агросемян включают в себя: 1) базовую калибровку пороговых значений индексов для 8-10 основных сельхозкультур; 2) разработку культуроспецифических комбинаций индексов (например, для масличных культур – акцент на каротиноидчувствительные индексы); 3) создание эталонных спектральных библиотек с привязкой к биохимическим параметрам; 4) оптимизацию алгоритмов для работы в условиях производственного конвейера (скорость – до 5000 семян/мин).

Экономическая целесообразность внедрения определяется соотношением стоимости семенного материала и прироста урожайности: для культур со стоимостью семян более 5000 руб/кг (томаты гибридные, цветочные культуры) окупаемость системы может составить 1-2 сезона; для массовых зерновых – 3-4 сезона. Ключевым фактором успеха станут разработка открытых баз данных спектральных характеристик и создание стандартизированных протоколов измерений, позволяющих сравнивать результаты между различными производителями оборудования и исследовательскими группами.

Таким образом, агрофизический подход на основе доступного RGB-сканирования и расчета нормализованных индексов может способствовать экономичному решению для интеграции в технологические цепочки адаптивного семеноводства не только средозащитных, но и сельскохозяйственных культур, работая на опережающее обеспечение качества на самом начальном этапе производственного цикла.

## Выводы

## Conclusions

1. Предлагаемая методика соответствует принципам адаптивного растениеводства и концепции целевого растения, обеспечивая возможность неразрушающего, экспрессного и экономичного скрининга семенного материала полезационных культур на этапе, предшествующем посеву. Это позволяет формировать посевные партии с предсказуемо высоким потенциалом прорастания, что важно для успешного создания устойчивых средозащитных насаждений.

2. Нормализованные спектральные индексы, рассчитанные на основе RGB-сканирования эпидермиса семян обыкновенной *Negorelskaya*, демонстрируют высокую статистическую значимость ( $p < 10^{-6}$  для 6 из 7 индексов) в прогнозировании их контейнерной всхожести на 50-й день. Индекс  $[(G+B-R)/(R+G+B)]^2$  показал максимальную дискриминационную способность ( $p = 1.42 \times 10^{-8}$ ), что подтверждает возможность объективной оценки потенциала прорастания до посева.

3. Установлен устойчивый спектральный паттерн, характеризующий семена с низкой всхожестью: относительное усиление красного и зеленого компонентов при одновременном ослаблении синего. Это выражается в повышении значений индексов  $[(R-B)/(R+B)]^2$  (+70,7%),  $[(G-B)/(G+B)]^2$  (+150%) и  $[(R+G-B)/(R+G+B)]^2$  (+9,2%) и снижении индексов  $[(R-G-B)/(R+G)]^2$  (-34,3%) и  $[(G+B-R)/(R+G+B)]^2$  (-25,2%) по сравнению с проросшими семенами.

4. Методика совместима со стандартными ПЗС-системами визуализации и требует минимальной модификации оборудования (рекомендуются 12-битный АЦП

и усиление синего канала). Ее внедрение в системы предпосевной сортировки позволит обрабатывать до 1000 семян/сек., формируя посевные партии с предсказуемо высокой всхожестью, что соответствует принципам адаптивного растениеводства и концепции целевого растения.

5. Выявленные закономерности и методологический подход обладают значительным потенциалом для адаптации к сельскохозяйственным культурам (зерновым, овощным, бобовым) после калибровки пороговых значений индексов и учета сортовой специфики. Интеграция спектрального модуля в существующие линии сортировки семян может повысить эффективность отбраковки некондиционного материала на 30-40%, особенно для культур с высокой стоимостью семян, обеспечивая экономическую целесообразность внедрения в течение 1-4 сезонов в зависимости от культуры.

### Список источников

1. Жученко А.А. *Адаптивное растениеводство*. М.: Колос, 2009. 520 с.
2. Николаев М.В. Климатические изменения и ведение полеводства в зоне осушаемых земель Европейского Нечерноземья России: уязвимость и адаптация // *Сельскохозяйственная биология*. 2023. Т. 58, № 1. С. 60–74. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2023.1.60rus>
3. Нейфельд В.В., Кадомцева М.Н. Механизмы адаптации растениеводства регионов ПФО к последствиям глобальных климатических изменений // *Аграрный научный журнал*. 2022. № 4. С. 37–43. <https://doi.org/10.28983/asj.y2022i4pp37-43>
4. Ивонин В.М., Воскобойникова И.В. Ландшафтная агролесомелиорация // *Мелиорация и гидротехника*. 2021. Т. 11, № 3. С. 54–77. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2021-11-3-54-77>
5. Примаков Н.В., Танюкевич В.В. Лесохозяйственные мероприятия в полезационных лесных полосах Краснодарского края // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2024. № 4 (400). С. 185–192. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-185-192>
6. Дубенок Н.Н., Кузьмичев В.В., Лебедев А.В. Анализ экологических функций древостоев березы и дуба в условиях урбанизированной среды по материалам долгосрочных наблюдений // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2018. № 5. С. 29–31. <https://doi.org/10.31857/S250026270000632-0>
7. Novikova T.P., Tylek P., Mastrangelo C.B., Drapalyuk M.V. et al. The root collar diameter growth reveals a strong relationship with the height growth of juvenile Scots pine trees from seeds differentiated by spectrometric feature. *Forests*. 2023;14(6):1164. <https://doi.org/10.3390/f14061164>
8. Новикова Т.П., Новиков А.И., Петрищев Е.П. Справочная информационная система FLR-Library для адаптивного лесовосстановления: кластерный анализ дескрипторов // *Лесотехнический журнал*. 2023. Т. 13, № 3 (51). С. 164–179. <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/12>
9. ElMasry G., ElGamal R., Mandour N., Gou P. et al. Emerging thermal imaging techniques for seed quality evaluation: Principles and applications. *Food Research International*. 2020;131:109025. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109025>
10. Xia Y., Xu Y., Li J., Zhang C. et al. Recent advances in emerging techniques for non-destructive detection of seed viability: A review. *Artificial Intelligence in Agriculture*. 2019;1: 35-47. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2019.05.001>
11. ElMasry G., Mandour N., Al-Rejaie S., Belin E. et al. Recent Applications of Multispectral Imaging in Seed Phenotyping and Quality Monitoring – An Overview. *Sensors*. 2019;19:1090. <https://doi.org/10.3390/s19051090>

12. ElMasry G., Mandour N., Wagner M.-H., Demilly D. et al. Utilization of computer vision and multispectral imaging techniques for classification of cowpea (*Vigna unguiculata*) seeds. *Plant Methods*. 2019;15:24. <https://doi.org/10.1186/s13007-019-0411-2>
13. Loddo A., Di Ruberto C. On the efficacy of handcrafted and deep features for seed image classification. *Journal of Imaging*. 2021;7:171. <https://doi.org/10.3390/jimaging7090171>
14. Bernardes R.K., De Medeiros A., da Silva L., Cantoni L. et al. Deep-Learning Approach for Fusarium Head Blight Detection in Wheat Seeds Using Low-Cost Imaging Technology. *Agriculture*. 2022;12:1801. <https://doi.org/10.3390/agriculture12111801>
15. Nehoshtan Y., Carmon E., Yaniv O. Robust seed germination prediction using deep learning and RGB image data. *Scientific Reports*. 2021;11:17126. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01712-6>
16. Reddy P., Panozzo J., Guthridge K.M. Single Seed Near-Infrared Hyperspectral Imaging for Classification of Perennial Ryegrass Seed. *Sensors*. 2023;23:1820. <https://doi.org/10.3390/s23041820>
17. Chen C., Bai M., Wang T. An RGB image dataset for seed germination prediction and vigor detection – maize. *Frontiers in Plant Science*. 2024;15:1341335. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1341335>
18. Li J., Xu F., Song S. Hyperspectral RGB Imaging Combined with Deep Learning for Maize Seed Variety Identification. *IEEE Access*. 2024;12:83788-83800. <https://doi.org/10.1109/access.2024.3419006>
19. Tigabu M., Daneshvar A., Jingjing R., Wu P. et al. 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? *Forests*. 2019;10:469. <https://doi.org/10.3390/f10060469>
20. Tigabu M., Daneshvar A., Wu P., Ma X. et al. Rapid and non-destructive evaluation of seed quality of Chinese fir by near infrared spectroscopy and multivariate discriminant analysis. *New Forests*. 2020;51:395-408. <https://doi.org/10.1007/s11056-019-09735-8>
21. Sokolov S.V., Kamensky V.V., Novikov A.I., Ivetic V. How to increase the analog-to-digital converter speed in optoelectronic systems of the seed quality rapid analyzer. *Inventions*. 2019;4(4):61. <https://doi.org/10.3390/inventions4040061>
22. Davis A.S., Pinto J.R. The Scientific Basis of the Target Plant Concept: An Overview. *Forests*. 2021;12:1293. <https://doi.org/10.3390/f12091293>

## References

1. Zhuchenko A.A. *Adaptive plant growing*. Moscow, Russia: Kolos, 2009:520. (In Russ.)
2. Nikolaev M.V. The impact of climate change on crop farming in the drained lands of the European Nonchernozem region of Russia: vulnerability and adaptation assessment. *Agricultural Biology*. 2023;58(1):60-74. (In Russ.) <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2023.1.60rus>
3. Neufeld V.V., Kadomtseva M.E. Mechanisms of adaptation of crop production in the regions of the Volga Federal District to the consequences of global climate change. *The Agrarian Science Journal*. 2022;(4):37-43. (In Russ.) <https://doi.org/10.28983/asj.y2022i4pp37-43>
4. Ivonin M.V., Voskoboynikova I.V. Landscape agroforestry reclamation. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2021;11(3):54-77. (In Russ.) <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2021-11-3-54-77>

5. Primakov N.V., Tanyukevich V.V. Forestry measures in shelterbelts of the Krasnodar Territory. *Russian Forestry Journal*. 2024;(4(400)):185-192. (In Russ.) <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-185-192>
6. Dubenok N.N., Kuzmichev V.V., Lebedev A.V. Analysis of ecological functions of birch and oak stands in conditions of an urbanized environment based on the materials of long-term observations. *Rossiiskaia selskokhoziaistvennaia nauka*. 2018;(5):29-31. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S250026270000632-0>
7. Novikova T.P., Tylek P., Mastrangelo C.B., Drapalyuk M.V. et al. The root collar diameter growth reveals a strong relationship with the height growth of juvenile Scots pine trees from seeds differentiated by spectrometric feature. *Forests*. 2023;14(6):1164. <https://doi.org/10.3390/f14061164>
8. Novikova T.P., Novikov A.I., Petrishchev E.P. FLR-library reference information system for adaptive forest restoration: cluster analysis of descriptors. *Forestry Engineering Journal*. 2023;(3(51)):164-179. (In Russ.) <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/12>
9. ElMasry G., ElGamal R., Mandour N., Gou P. et al. Emerging thermal imaging techniques for seed quality evaluation: Principles and applications. *Food Research International*. 2020;131:109025. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109025>
10. Xia Y., Xu Y., Li J., Zhang C. et al. Recent advances in emerging techniques for non-destructive detection of seed viability: A review. *Artificial Intelligence in Agriculture*. 2019;1: 35-47. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2019.05.001>
11. ElMasry G., Mandour N., Al-Rejaie S., Belin E. et al. Recent Applications of Multispectral Imaging in Seed Phenotyping and Quality Monitoring – An Overview. *Sensors*. 2019;19:1090. <https://doi.org/10.3390/s19051090>
12. ElMasry G., Mandour N., Wagner M.-H., Demilly D. et al. Utilization of computer vision and multispectral imaging techniques for classification of cowpea (*Vigna unguiculata*) seeds. *Plant Methods*. 2019;15:24. <https://doi.org/10.1186/s13007-019-0411-2>
13. Loddo A., Di Ruberto C. On the efficacy of handcrafted and deep features for seed image classification. *Journal of Imaging*. 2021;7:171. <https://doi.org/10.3390/jimaging7090171>
14. Bernardes R.K., De Medeiros A., da Silva L., Cantoni L. et al. Deep-Learning Approach for Fusarium Head Blight Detection in Wheat Seeds Using Low-Cost Imaging Technology. *Agriculture*. 2022;12:1801. <https://doi.org/10.3390/agriculture12111801>
15. Nehoshtan Y., Carmon E., Yaniv O. Robust seed germination prediction using deep learning and RGB image data. *Scientific Reports*. 2021;11:17126. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01712-6>
16. Reddy P., Panozzo J., Guthridge K.M. Single Seed Near-Infrared Hyperspectral Imaging for Classification of Perennial Ryegrass Seed. *Sensors*. 2023;23:1820. <https://doi.org/10.3390/s23041820>
17. Chen C., Bai M., Wang T. An RGB image dataset for seed germination prediction and vigor detection – maize. *Frontiers in Plant Science*. 2024;15:1341335. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1341335>
18. Li J., Xu F., Song S. Hyperspectral RGB Imaging Combined with Deep Learning for Maize Seed Variety Identification. *IEEE Access*. 2024;12:83788-83800. <https://doi.org/10.1109/access.2024.3419006>
19. Tigabu M., Daneshvar A., Jingjing R., Wu P. et al. 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? *Forests*. 2019;10:469. <https://doi.org/10.3390/f10060469>

20. Tigabu M., Daneshvar A., Wu P., Ma X. et al. Rapid and non-destructive evaluation of seed quality of Chinese fir by near infrared spectroscopy and multivariate discriminant analysis. *New Forests*. 2020;51:395-408. <https://doi.org/10.1007/s11056-019-09735-8>

21. Sokolov S.V., Kamensky V.V., Novikov A.I., Ivetić V. How to increase the analog-to-digital converter speed in optoelectronic systems of the seed quality rapid analyzer. *Inventions*. 2019;4(4):61. <https://doi.org/10.3390/inventions4040061>

22. Davis A.S., Pinto J.R. The Scientific Basis of the Target Plant Concept: An Overview. *Forests*. 2021;12:1293. <https://doi.org/10.3390/f12091293>

### Сведения об авторах

**Новиков Артур Игоревич**, д-р техн. наук, профессор РАН, ведущий научный сотрудник отдела 140 – управления агротехнологиями и агромониторинга, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Агрофизический научно-исследовательский институт» (ФГБНУ АФИ); 195220, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14; e-mail: [nvatdo@gmail.com](mailto:nvatdo@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0003-1230-0433>

**Лебедев Александр Вячеславович**, д-р с.-х. наук, доцент, доцент кафедры землеустройства и лесоводства, Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: [alebedev@rgau-msha.ru](mailto:alebedev@rgau-msha.ru); <https://orcid.org/0000-0002-8939-942X>

**Новикова Татьяна Петровна**, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова»; 194021, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Институтский переулок, 5, корп. 1; e-mail: [novikova\\_tp.vglta@mail.ru](mailto:novikova_tp.vglta@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0003-1279-3960>

### Information about the authors

**Arthur I. Novikov**, DSc (Eng), Professor of the Russian Academy of Sciences, Leading Research Associate at the Department of Agricultural Technologies and Agromonitoring Management, Agrophysical Research Institute; 14 Grazhdanskiy Ave., Saint Petersburg, 195220, Russian Federation; e-mail: [nvatdo@gmail.com](mailto:nvatdo@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0003-1230-0433>

**Aleksandr V. Lebedev**, DSc (Ag), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Land Management and Forestry, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: [alebedev@rgau-msha.ru](mailto:alebedev@rgau-msha.ru); <https://orcid.org/0000-0002-8939-942X>

**Tatyana P. Novikova**, CSc (Eng), Associate Professor, Senior Research Associate, Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov; 5, Bldg. 1, Institutskiy Ln., Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; e-mail: [novikova\\_tp.vglta@mail.ru](mailto:novikova_tp.vglta@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0003-1279-3960>