


Оригинальная статья


DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/11>

УДК 630.232 : (004.652.4 + 303.722.4)




Технология восстановления лесных ландшафтов: разработка алгоритма функционирования справочной информационной системы FLR-Library

Татьяна П. Новикова ✉, novikova_tp.vglta@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-1279-3960>

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

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

Светлана А. Евдокимова, evdsv@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-5559-4350>

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

Чаще всего восстановление лесных ландшафтов в Российской Федерации проводят на землях первой группы (лесные земли, не покрытые лесом), реже – второй группы (нелесные земли лесного фонда). Облесение земель третьей группы – земель, в настоящее время не относящихся к лесному фонду, но после проведения мероприятий по посадке леса и успешной их реализации, в будущем имеющие перспективы к переходу в земли лесного фонда – происходит локально. Проанализировали типовые проекты по лесоразведению и лесовосстановлению, изучили нормативно-правовые акты (Правила лесоразведения, Правила лесовосстановления), локальные распоряжения и постановления в области лесоразведения, таксационные описания лесотаксационных выделов, научные работы и рекомендации отечественных и зарубежных авторов в области лесовосстановления и лесоразведения, по проектированию технологий лесоразведения и лесовосстановления, влиянию почв на выбор машин, механизмов и технологии облесения. На основе анализа уточнили классификацию лесных земель для выбора технологии адаптивного восстановления. Обнаружили некоторые противоречия при классификации типов почвы, оказывающих непосредственное влияние на выбор технологии и технических средств, подтверждающих актуальность создания единой классификации, удобной при разработке проектов лесовосстановления или лесоразведения. Статистическую оценку степени влияния физико-механических свойств почвы, а также степени зависимости выбора технических средств и степени контролируемости свойств почвы (1 – слабая, 2 – умеренная, 3 – сильная) в процессе принятия решения по выбору технологии адаптивного восстановления лесных ландшафтов осуществляли с помощью иерархической кластеризации методом Дж. Варда-младшего с использованием меры Минковского, достаточно устойчивой к выбросам, на уровне значимости $\alpha = 0.05$. С учетом проанализированных входных параметров сформировали базовый алгоритм функционирования FLR-системы, на основе которого будет разработано программное обеспечение для поддержки принятия управленческих решений при реализации проектов адаптивного восстановления лесных ландшафтов.

Ключевые слова: технологии восстановления лесных ландшафтов, адаптивное лесовосстановление, алгоритм, справочная система, технические средства, машины и механизмы.

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-26-00102, <https://rscf.ru/project/23-26-00102/>.

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


Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.


Для цитирования: Технология восстановления лесных ландшафтов: разработка алгоритма функционирования справочной информационной системы FLR-Library / Т. П. Новикова, А. И. Новиков, Е. П. Петрищев, С. А. Евдокимова // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 3 (55). – С. 186–203. – Библиогр.: с. 196–202 (48 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/11>.

Поступила 16.08.2024. *Пересмотрена* 20.09.2024. *Принята* 23.09.2024. *Опубликована онлайн* 11.11.2024.

Article

Forest landscape restoration technology: development of an algorithm for the operation of the FLR-Library reference information system

Tatyana P. Novikova ✉, novikova_tp.vglta@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-1279-3960>

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

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

Svetlana A. Evdokimova, evdsv@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-5559-4350>

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

Abstract

Most often, restoration of forest landscapes in the Russian Federation is carried out on the lands of the first group (forest lands not covered with forest), less often – the second group (non-forest lands of the forest fund). Afforestation of the lands of the third group – lands that currently do not belong to the forest fund, but after carrying out measures to plant forests and successfully implement them, in the future with prospects for transition to the lands of the forest fund – occurs locally. We analyzed standard projects on afforestation and reforestation, studied normative legal acts (Rules of afforestation, Rules of reforestation), local orders and resolutions in the field of afforestation, tax descriptions of forest taxing allotments, scientific works and recommendations of domestic and foreign authors in the field of reforestation and afforestation, on the design of technologies for afforestation and reforestation, the influence of soils on the choice of machines, mechanisms and technologies of afforestation. Based on the analysis, the classification of forest lands was clarified for the selection of adaptive restoration technology. We found some contradictions in the classification of soil types, which have a direct impact on the choice of technology and technical means, confirming the relevance of creating a unified classification convenient for the development of reforestation or afforestation projects. A statistical assessment of the degree of influence of the physical and mechanical properties of the soil, as well as the degree of dependence of the choice of technical means and the degree of controllability of soil properties (1 - weak, 2 – moderate, 3 – strong) in the decision-making process on the choice of technology for adaptive restoration of forest landscapes was carried out using hierarchical clustering by the method of J. Ward Jr. using the Minkowski measure, which is sufficiently resistant to emissions, at the significance level $\alpha = 0.05$. Taking into account the analyzed input parameters, a basic algorithm for the functioning of the FLR system was formed, on the basis of which software will be developed to support management decision-making in the implementation of projects for adaptive restoration of forest landscapes.

Keywords: *forest landscape restoration technologies, adaptive reforestation, algorithm, reference system, technical means, machines and mechanisms.*

Funding: this study has been supported by the grants the Russian Science Foundation, RSF 23-26-00102, <https://rscf.ru/project/23-26-00102/>.

Acknowledgments: the authors thank the reviewers of their contribution to the expert evaluation of the article.

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

For citation: Novikova T. P., Novikov A. I., Petrishchev E. P., Evdokimova S. A. (2024). Forest landscape restoration technology: development of an algorithm for the operation of the FLR-Library reference information system. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 3 (55), pp. 186-203 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/11>.

Received 16.08.2024. **Revised** 20.09.2024. **Accepted** 23.09.2024. **Published online** 11.11.2024.

Введение

В основе справочной информационной системы для адаптивного восстановления лесных ландшафтов (FLR-Library) [1] должен лежать алгоритм [9], описывающий действия системы в зависимости от входных данных. Алгоритм реализации различных технологий восстановления лесных ландшафтов в первой вариации был представлен в работе автора Т.П. Новикова (2022) [2].

На основе исследований по гранту РФФ 23-26-00102 [1] первого года было получено определение лесного ландшафта как «набора характерных элементов, характеризующих лесную местность» (Т.П. Новикова и соавторы (2023) [4]). Под восстановлением лесных ландшафтов в контексте данного

исследования понимаем приращение лесных площадей (Т.П. Новикова (2023) [3]). Обычно, под термином лесная площадь понимают «площадь лесного фонда, на которой произрастает или может произрастать лес»¹. В исследовании Т.П. Новиковой (2023) [1] под приращением лесных площадей понимается только увеличение земель, покрытых лесом, посредством посадки саженцев или высевания лесных семян древесных пород, в идеальном случае, с преобладанием лесообразующей породы. Таким образом, согласно рис. 1 и статье 6.1 ЛК РФ², для поставленных целей приращения лесных площадей подходят:

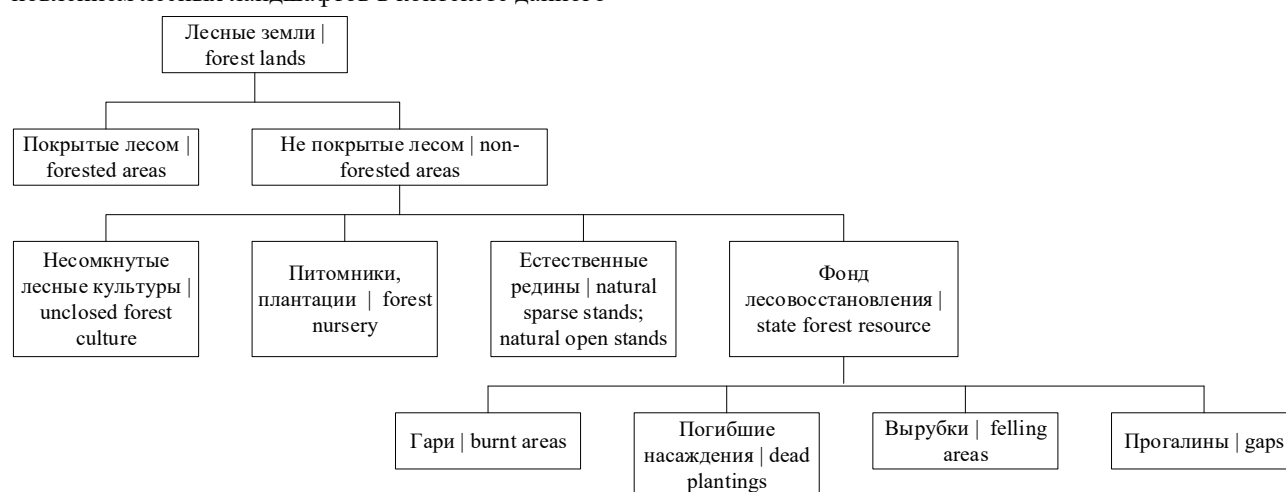


Рисунок 1. Классификация лесных земель для выбора технологии адаптивного восстановления

Figure 1. Classification of forest lands for the selection of adaptive restoration technology

Источник: собственные результаты авторов

Source: own results

¹МЧС России. Термины: <https://mchs.gov.ru/ministerstvo/o-ministerstve/terminy-mchs-rossii/term/242>

²Лесной кодекс Российской Федерации от 04.12.2006 N 200-ФЗ (ред. от 08.08.2024) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.09.2024) : https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/ee7af8f2c965ebfa961cd92f3446278b87d7678d/

1) лесные земли, не покрытые лесом, а именно: гари (*post-fire sites*, как у Новикова и Иветича | 2019 [10]), погибшие насаждения (*dead / decline stands*, как у М. Янчо и др. | 2024 [11]), вырубki (*selective logging*, как у С. Армента-Монтеро и др. | 2020 [12]), прогалины (*gap planting technology*, как у Э. Симангунсонга | 2023 [13]). В этом случае применяются общепринятые технологии лесовосстановления: подготовка площадей (расчистка и раскорчевка при необходимости); обработка почвы; подготовка лесопосадочного материала; посадка;

2) нелесные земли лесного фонда - «необходимые для освоения лесов (просеки, дороги и другие), и земли, «неудобные для использования», согласно ЛК РФ, статье 6.1. «Земли лесного фонда» и патенту 2714705 «Способ восстановления леса [14]». С учетом развития технологии высева с применением БПЛА (Соколов и др. | 2017 [15]; Новиков и Эрссон | 2019 [16]; М. Мохан и др. | 2021 [17]) «неудобные для использования земли» – каменистые почвы, заболоченная местность, овраги, балки и другие труднодоступные территории – становятся потенциально пригодными для лесоразведения;

3) земли, в настоящее время не относящиеся к лесному фонду, но после проведения мероприятий по посадке леса и успешной их реализации, в будущем имеющие перспективы к переходу в земли лесного фонда. Примером посадки древесных пород на нелесных землях с последующим в будущем их переводом в лесные земли лесного фонда может служить региональная инициатива правительства Белгородской области – проект «Зеленая столица»¹, который предполагает, в том числе, облесение эрозивно опасных участков и рекультивацию территорий, подвергшихся техногенному воздействию; защитное лесоразведение в Волгоградской области², направленное на борьбу с опустыниванием и деградацией земель.

Для первой группы земель подходят классические технологии лесовосстановления.

Вторая группа «требует» применения новых технических средств и корректировки существующих технологий облесения. Например, для повышения качества лесосеменного материала возможно использование оптических инструментальных методов и совершенствование технических средств, построенных на этих принципах, как у С.В. Соколова и др. (2019) [18,19,20], М.В. Драпалюка и др. (2019) [21,22], Б. Эрссона и др. (2020) [23], М. Тигабу и др. (2021) [24], Р. Бернардеса и др. (2021) [25], П. Тылека и др. (2022, 2023) [26,27], В. Иветича и др. (2019) [28,29], А.И. Новикова (2021) [30], И.В. Бачерикова и др. (2022) [31] Н.С. Прияткина (2024) [32].

Третья группа земель нуждается в изменении существующих технологий облесения, которые должны базироваться на научных экспериментах в области лесомелиорации, техногенного загрязнения и изменения климата.

На сегодняшний день лесовосстановление и лесоразведение проводят на землях первой группы, редко – второй. Облесение земель третьей группы происходит локально.

Ведущей организацией РФ в области механизации лесного хозяйства (ВНИИЛМ, г. Пушкино МО) разработаны рекомендации по использованию технологии лесоразведения на песчаных почвах, в которых уточнены технологические операции процесса пересадки сеянцев на постоянную площадь, где, цитата: «подрезку корневых систем перед посадкой проводить нецелесообразно, так как ее длина после выкопки из питомника позволяет растениям нормально прижиться и развиваться [45]».

Предложенный авторами алгоритм нацелен на выбор и реализацию технологических процессов, поддерживающих не только лесовосстановление, но и приращение покрытых лесом площадей.

Материалы и методы

Объект и предмет исследования

В качестве объекта рассматривали процесс приращения лесных площадей посредством облесения нелесных площадей и обезлесенных лесных.

¹Правительство Белгородской области. Распоряжение от 25 января 2010 года № 35-рп О концепции областного проекта "Зеленая столица"(с изменениями на 25 марта 2024 года) : <https://docs.cntd.ru/document/428670861>.

²Стратегия развития защитного лесоразведения в Волгоградской области на период до 2025 года / К. Н. Кулик [и др.]. – 2-е изд., испр. и доп. – Волгоград: ФНИЦ агроэкологии РАН, 2019. – 39 с.

В качестве предмета исследований рассматривали последовательность выбора технологических операций и применяемых технических средств в данном процессе.

Процесс проектирования алгоритма

В качестве входных данных на основе типового проекта лесоразведения для алгоритма были взяты следующие параметры:

- категория площади лесоразведения (пески, овражно-балочные системы, рекультивируемые земли, осушенные болота, земли после сельскохозяйственного пользования, пашня, иные);

- площадь участка, га;
- рельеф участка (уклон);
- гидрологические условия (увлажнение);
- тип почвы;

- пригодность участка для работы техники (пригоден без предварительных мероприятий, требуется проведение специальных мероприятий: террасирование, мелиорация, рекультивация);

- основные лесные древесные породы;
- вид посадочного материала.

В качестве входных данных на основе типового проекта лесовосстановления¹, для алгоритма были взяты следующие параметры:

- причина лесовосстановления;
- количество пней на 1 га;
- характер и размещение оставленных деревьев;
- возможность содействия естественному лесовозобновлению;
- степень задернения почвы;
- степень минерализации почвы;
- состояние очистки от порубочных остатков (захламленность);
- категория доступности для техники.

Алгоритм информационной системы для адаптивного лесовосстановления должен решать две задачи:

1) Предлагать готовую технологию восстановления лесных ландшафтов и рекомендации по выбору машин и механизмов для реализации предложенной технологии.

2) На базе имеющегося парка лесных машин и технологического оборудования предложить оптимальную технологию лесовосстановления.

Анализ данных

Построение алгоритма функционирования справочной информационной системы FLR-Library осуществляли на основе теории алгоритмов, а визуализацию с использованием программного комплекса Visio.

Построение модели данных, учитывающей сведения о влажности почвы, типе почвы и ЛРУ и их влиянии на выбор типов машин и механизмов для приращения лесных площадей была, осуществляли на основе теории реляционных баз данных, а визуализацию с использованием программного комплекса Visio.

Статистическую оценку степени влияния физико-механических свойств почвы, а также степени зависимости выбора технических средств и степени контролируемости свойств почвы (1 – слабая, 2 – умеренная, 3 – сильная) в процессе принятия решения по выбору технологии адаптивного лесовосстановления осуществляли с помощью иерархической кластеризации методом Дж. Варда-младшего с использованием меры Минковского, достаточно устойчивой к выбросам. Визуализацию и обработку данных осуществляли в программном комплексе SPSS (v25).

Результаты

Для дальнейшего использования информации о влажности почвы, типе почвы и ЛРУ и их влиянии на выбор типов машин и механизмов была предложена реляционная модель базы данных «Физико-механические свойства почвы, учитываемые в процессе восстановления лесных ландшафтов» (рис. 2).

Площадь участка, а точнее размер, позволяет определить количество проходов техники, длину борозды и количество борозд.

Рельеф участка, а именно уклон, определяет возможность применения тракторов и культиваторов. Так, для наиболее распространенных: трактора МТЗ-82 уклон рельефа может составлять до 20° (у модифицированных версий – до 25°), культиватора КН-1,8 рабочий уклон составляет до 12°, а для плуга

¹Проект лесовосстановления на лесном участке № 22 ПАО "Россети" 865;371;274 / 2023 год :

<https://irkobl.ru/sites/alh/vosproizvodstvo/ProektyLesovosst/Padunskoe/kv.37%20в.3,4,8.pdf>

ПЛН-3-35 уклон возможен только до 8°. Таким образом, наличие уклона может сделать невозможными некоторые технологические операции и встанет вопрос о применении альтернативных технологий, например, БПЛА.

Увлажнение почвы влияет на применимость конкретных машин и оборудования. Так, например,

применимость тракторов на колесном шасси (в лесхозах центрального черноземного региона широкое применение получил МТЗ-82 и его модификации) будет ограничена в случае застоя поверхностных вод на восстанавливаемом участке.

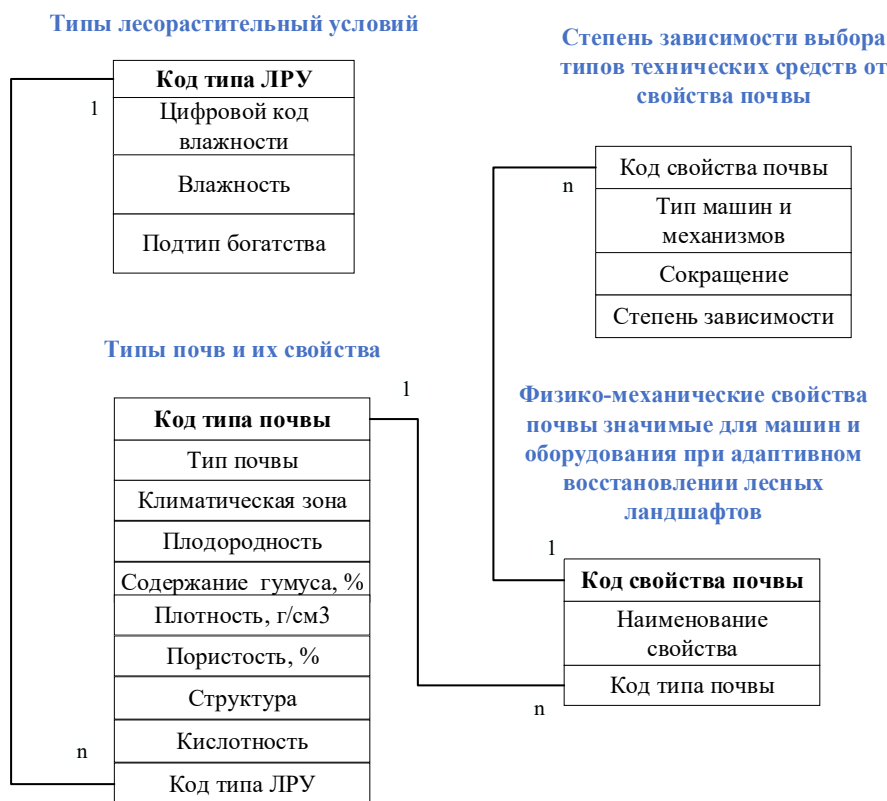


Рисунок 2. Реляционная модель для базы данных «Физико-механические свойства почвы, учитываемые в процессе восстановления лесных ландшафтов»

Figure 2. Relational model for the database «Physical and mechanical properties of soil taken into account in the process of forest landscapes restoration»

Источник: собственные результаты авторов

Source: own results

Тип почвы оказывает влияние на глубину заделки саженцев (тип почвы может охарактеризовать чередование горизонтов и их мощность), выбор технологии обработки почвы. Согласно Правилам лесоразведения¹ и Правилам лесовосстановления² в проектах на лесоразведение и лесовосстановление

указывается «почва». В Правилах нет указания какая именно классификация должна быть использована при указании почвы, однако, на примере проектов из открытых источников можно утверждать, что в основе используемой классификации лежит клас-

¹Об утверждении Правил лесоразведения, формы, состава, порядка согласования проекта лесоразведения, оснований для отказа в его согласовании, а также требований к формату в электронной форме проекта лесоразведения (с изменениями на 21 августа 2023 года): <https://docs.cntd.ru/document/728111120>.

²Об утверждении Правил лесовосстановления, формы, состава, порядка согласования проекта лесовосстановления, оснований для отказа в его согласовании, а также требований к формату в электронной форме проекта лесовосстановления (с изменениями на 3 августа 2023 года): <https://docs.cntd.ru/document/728111110>.

сификация по климатическим полосам В.В. Докучаева¹: подзолистые, дерново-подзолистые, серые лесные, бурые лесные, черноземы, каштановые и др. Также следует учитывать, что в таксационном описании лесотаксационных выделов уже нет понятия «почва», а учитывается тип лесорастительных (ТЛУ) условий, который определяют рельеф и почвенно-грунтовые условия [6]. ТЛУ согласно нормативно-правовым актам² представлены в буквенно-цифровой кодировке, где буквы А,В,С,Д согласно системе П.С. Погребняка соответствуют богатству почвы (А -бедные), а цифры от 0 до 5 – подтипы влажности (0 – очень сухие, 5 – мокрые).

Набор данных размещен в репозитории Mendeley Data.

На рис. 3 приведена дендрограмма сходства и различия влияния физико-механических свойств на выбор технологии. Можно видеть влияние свойств почвы на выбор технологии и группы технических средств и отсутствие влияния на выбор конкретной машины.

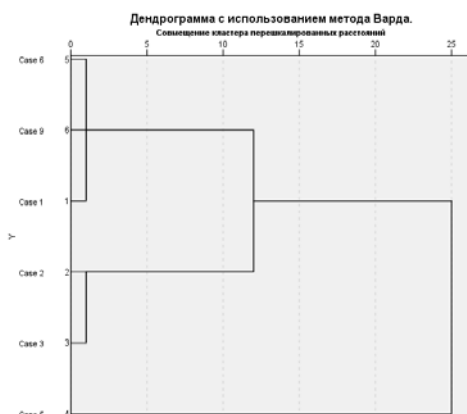


Рисунок 3. Диаграмма сходства и различия степени влияния физико-механического свойства почвы на процесс принятия решения по выбору технологии адаптивного лесовосстановления

Figure 3. Diagram of similarities and differences in the degree of influence of the physical and mechanical properties of the soil on the decision-making process on the choice of adaptive reforestation technology

Источник: собственные результаты авторов
Source: own results

На рис. 4 приведена дендрограмма сходства и различия степени зависимости выбора (слабой, умеренной, сильной) технических средств и степени контролируемости свойств почвы в разных технологических условиях производства лесных культур под влиянием физико-механических свойств почвы. Можно видеть выраженное влияние зависимости технических средств, технологических условий произрастания и свойств почвы.



Рисунок 4. Диаграмма сходства и различия степени зависимости выбора (слабой, умеренной, сильной) технических средств и степени контролируемости свойств почвы в разных технологических условиях производства лесных культур под влиянием физико-механических свойств почвы

Figure 4. Diagram of similarities and differences in the degree of dependence of the choice (weak, moderate, strong) of technical means and the degree of control of soil properties in different technological conditions of forest crop production under the influence of physical and mechanical properties of soil

Источник: собственные результаты авторов
Source: own results

На рис. 5 представлен алгоритм справочной информационной системы FLR-Library.

¹Самофалова, И.А. Современные проблемы классификации почв: учебное пособие. / И.А. Самофалова; М-во с.-х. РФ, ФГБОУ ВПО Пермская ГСХА. – Пермь: Изд-во ФГБОУ ВПО Пермская ГСХА, 2013. – 171 с.

²Приказ от 23 октября 2019 года N 1584 О внесении изменений в приказ управления лесного хозяйства Воронежской области от 03.09.2018 N 843: <https://docs.cntd.ru/document/561615727>

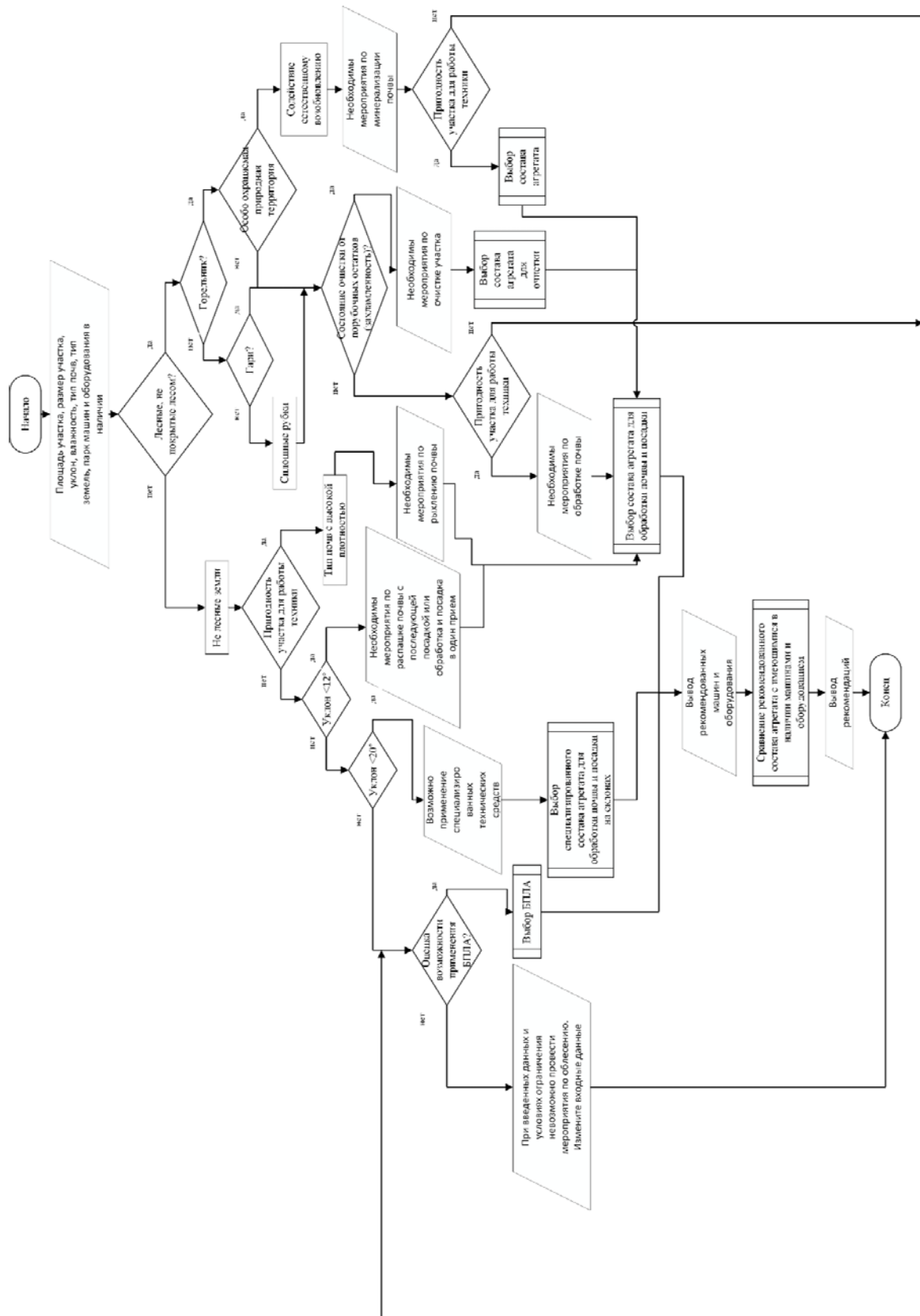


Рисунок 5. Алгоритм справочной информационной системы FLR-Library

Источник: собственные результаты авторов

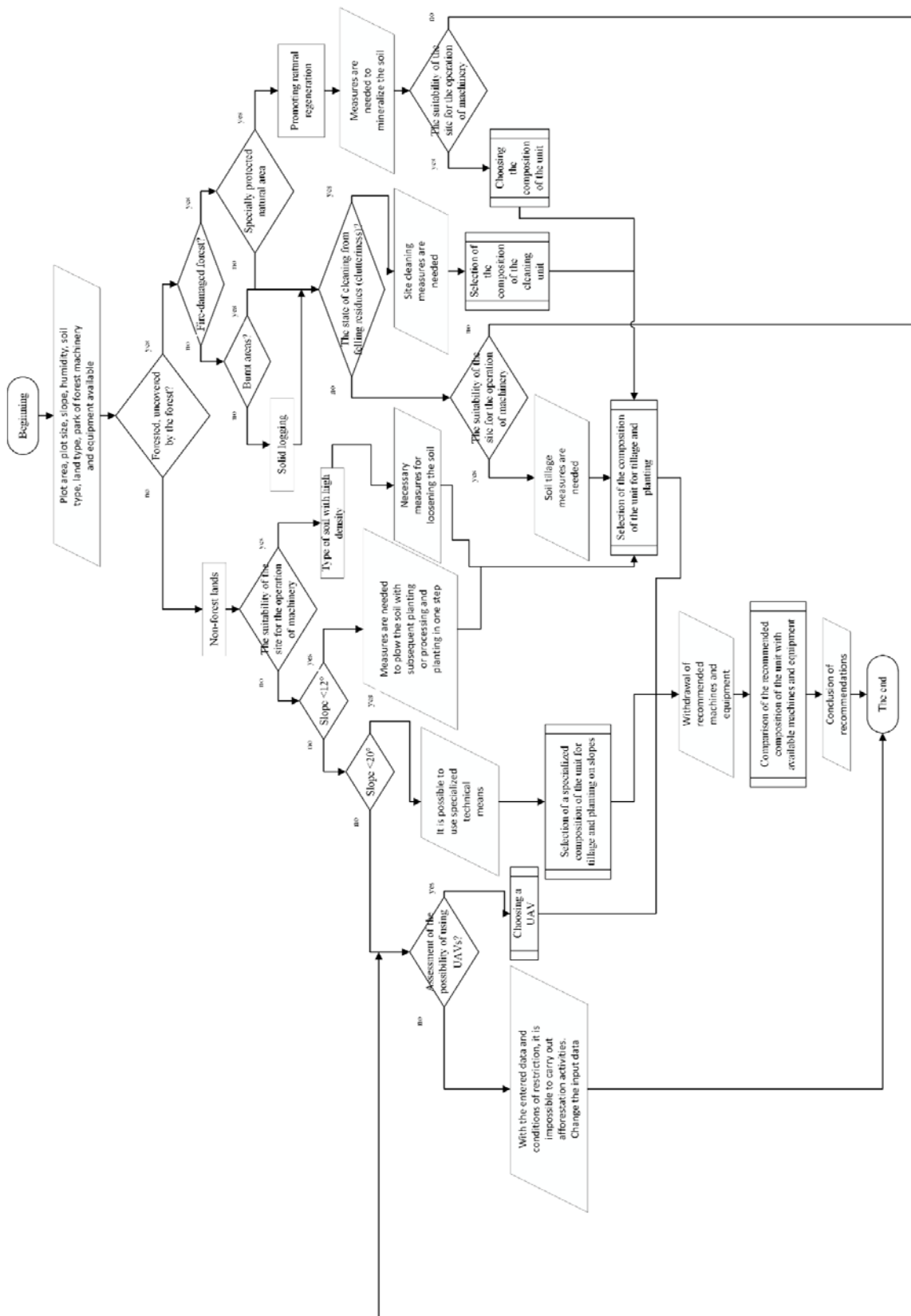


Figure 5. The algorithm of the FLR-Library reference information system

Source: own results

При реализации алгоритма стояла задача подбора технологических операций, базирующаяся на исходных данных об участке облесения и наличии парка машин и механизмов. Предложенный алгоритм информационной системы ляжет в основу программного обеспечения справочной информационной системы FLR-Library для поддержки принятия управленческих решений при реализации проектов адаптивного восстановления лесных ландшафтов.

Выбор основной древесной породы происходит из местных лесообразующих пород, возможен выбор интродуцентов.

Выбор посадочного материала обуславливается природно-климатическими условиями, рельефом, типом почв. Вид посадочного материала и выбор технологии облесения взаимосвязаны. Подготовка лесосеменного материала было уделено внимание в работах Т.П. Новиковой (2023) [3], М.В. Драпалюка (2022) [7], С.В. Ребко (2023) [8] и др.

Как было сказано ранее увеличение лесных площадей должно быть за счет облесения лесных земель, ранее покрытых лесом (лесовосстановление), лесных земель, ранее не покрытых лесом и нелесных земель (лесоразведение). При лесовосстановлении необходимо понимание в следствие чего произошло обезлесивание территории: пожар, рубки, гибель насаждения от вредителей, так как это определяет состояние участка, отданного под лесовосстановление. Если участок после пожара, то в случае гарей необходимо до мероприятий по лесовосстановлению очистить участок, а если в результате пожара образовался горельник, то здесь может идти речь о содействии естественному лесовосстановлению. Также при лесовосстановлении необходимо учитывать наличие пней – до 600 тыс. штук на гектар мероприятия по раскорчевке и понижению пней не проводится, свыше 600 тыс. штук на гектар – требуются дополнительные мероприятия и лесные машины для подготовки площади.

Типовой проект лесоразведения включал параметр «уклон», так как ранее лес на данной площади не произрастал, а значит ограничивающим фактором работы машин может стать уклон. В проекте лесовосстановления параметра «уклон» нет, но

появляется «категория доступности для техники», т.е. с одной стороны территория, на которой ранее произрастал лес должна быть доступна для техники, при условии, что это были лесные культуры, с другой – только 7% мировых лесов являются лесными культурами¹.

Обсуждение

Наш проект (РНФ 23-26-00102) [1] связан с адаптивным восстановлением лесных ландшафтов, например, как у П. Спатхелфа и др. (2018) [33], Дж. Каспера и др. (2021) [34], Н. Тиффо и др. (2024) [35], Б. Ройтберга и др. (2024) [36], М. Пардоса и др. (2022) [37], Г. Моро и др. (2022) [38], Н. Прохоровой и З. Говедара (2021) [39], Р. Хазарики и др. (2021) [40], А. Болте и др. (2023) [41].

Тем не менее, под адаптивным восстановлением мы видим не только восстановление площадей, когда-то покрытых лесом, но и увеличение лесных площадей за счет облесения земель, ранее не покрытых лесом. Взаимовлияние и прямая связь между площадью лесов на планете и изменением климата прослеживается во многих научных работах А. Ройо и др. (2023) [42], Петерсона Сен-Лорана (2018) [43], Я. Мюллера и др. (2019) [44], Э. Густафссона и др. (2020) [46], С. Ройера-Тардиффа и др. (2021) [47], М. Матаруги и др. (2023) [48]: сокращение лесных площадей приводит к увеличению средней температуры на планете, что приводит к таянию ледников и изменению океанических течений, а это ведет к глобальному изменению климата; изменение климата приводит к смене условий произрастания деревьев (засухи, увеличение среднегодовой температуры и т.п.), что негативно сказывается на росте деревьев и плодоношении (наблюдается сокращение объемов лесных семян). Таким образом, чтобы замедлить изменение климата и нивелировать его последствия, недостаточно проводить мероприятия по лесовосстановлению – необходимо приращение покрытых лесом площадей посредством облесения пустующих земель, в том числе и труднокультивируемых.

¹Глобальная оценка лесных ресурсов 2020 года // Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных

Наций : <https://usfeu.ru/sveden/Documents/Metod/анализ%20по%20лесным%20ресурсам.pdf>.

Заключение

В результате исследования были проанализированы типовые проекты по лесоразведению и лесовосстановлению, изучены нормативно-правовые акты (Правила лесоразведения, Правила лесовосстановления), локальные областные распоряжения и постановления в области лесоразведения, таксационные описания лесотаксационных выделов, научные работы и рекомендации отечественных и зару-

бежных авторов в области лесовосстановления и лесоразведения, по проектированию технологий лесоразведения и лесовосстановления, влиянию почв на выбор машин, механизмов и технологии облесения. Анализ показал, какие входные параметры необходимо учитывать при создании алгоритма, который будет базой программного обеспечения справочной информационной системы FLR-Library для поддержки принятия управленческих решений при реализации проектов адаптивного восстановления лесных ландшафтов.

Список литературы

1. Новикова, Т. П. Разработка справочной информационной системы для адаптивного восстановления лесных ландшафтов (FLR-library) // НИР: грант № 23-26-00102. Российский научный фонд. 2023. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53916036>
2. Novikova, T. P. The choice of a set of operations for forest landscape restoration technology / T. P. Novikova // Inventions. – 2022. – Vol. 7, No. 1. – DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions7010001>.
3. Новикова, Т. П. Оценка качества лесосеменного материала на экспериментальном участке сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) при адаптивном восстановлении лесных ландшафтов / Т. П. Новикова // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13, № 1(49). – С. 112-128. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2023.1/8. URL: <https://www.elibrary.ru/rvwowr>.
4. Новикова, Т. П. Справочная информационная система FLR-Library для адаптивного лесовосстановления: кластерный анализ дескрипторов / Т. П. Новикова, А. И. Новиков, Е. П. Петрищев // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13, № 3(51). – С. 164-179. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2023.3/12. URL: <https://www.elibrary.ru/uzokyx>.
5. Новикова, Т. П. Влияние изменения климата на управление лесовосстановлением / Т. П. Новикова, Т. В. Новикова, А. И. Новиков // Наука и инновации в современном мире : Материалы Национальной научно-практической конференции, Воронеж, 22 января 2024 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2024. – С. 53-58. – DOI 10.58168/SIMW2024_53-58. URL: <https://www.elibrary.ru/kokewa>.
6. Ханина, Л.Г. Классификация типов лесорастительных условий по индикаторным видам Воробьева-Погребняка: база данных и опыт анализа лесотаксационных данных // Вопросы лесной науки, № 4. – 2019. DOI 10.31509/2658-607x-2019-2-4-1-28. URL: <https://www.elibrary.ru/wymkha>.
7. Экспресс-анализ семян в лесохозяйственном производстве: теоретические и технологические аспекты / М. В. Драпалок [и др.]. – Воронеж, 2022. – 176 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48309574>.
8. Влияние индивидуальной массы семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) сорта «Негорельская» на 30-дневное прорастание в 40-ячеистых SideSlit-контейнерах / С.В. Ребко [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2023. – Vol. 13. – № 2 (50). – С. 59-86. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/4>.
9. Разработка алгоритма и модели функционирования информационной системы для малого сельскохозяйственного предприятия / Т. В. Новикова [и др.] // Моделирование систем и процессов. – 2020. – Т. 13, № 4. С. 53-58. – DOI 10.12737/2219-0767-2021-13-4-53-58. – URL: <https://www.elibrary.ru/qdcyvj>.
10. Novikov, A.I. The effect of seed coat color grading on height of one-year-old container-grown Scots pine seedlings planted on post-fire site / A. I. Novikov, V. Ivetic // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. – Vol. 226, – Article 012043. – DOI 10.1088/1755-1315/226/1/012043. – EDN XOPMBD.

11. Jančo, M., Danko, M., Sleziaк, P., Holko, L. Estimation of the leaf area index in a decline spruce forest in the Western Tatra Mountains for determination of rainfall interception // *Acta Hydrologica Slovaca*, 2024; 25 (1): 106-114. DOI: <https://doi.org/10.31577/ahs-2024-0025.01.0012>.
12. Carbon emissions from selective logging in the southern Yucatan Peninsula, Mexico / S. Armenta-Montero, E.A. Ellis, P.W. Ellis et al. // *Madera y Bosques*. – 2020. – Vol. 26. – № 1. – DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2611891>.
13. Elias, B.C.H. The application of gap planting technology to rehabilitate degraded natural forest / Elias, B.C.H. Simangunsong // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2023. – Vol. 1220. – № 1. – P. 012029. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1220/1/012029>.
14. Патент 2714705 Российская Федерация, МПК А 01 G 23/00. Способ восстановления леса / Заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. лесотехн. ун-т. – № 2019115418 ; заявл. 20.05.2019 ; опублик. 19.02.2020, Бюл. №5. Режим доступа: <https://elibrary.ru/gzdlvj>.
15. Тенденции развития операционной технологии аэросева беспилотными летательными аппаратами в лесовосстановительном производстве / С.В. Соколов [и др.] // *Лесотехнический журнал*. – 2017. – Т. 7. – № 4. – С. 190-205. – DOI: https://doi.org/10.12737/article_5a3d040dc79c79.94513194.
16. Novikov, A.I. Aerial seeding of forests in Russia: A selected literature analysis / A.I. Novikov, B.T. Ersson // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 226. – № 1. – Article 012051. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012051>.
17. UAV-Supported Forest Regeneration: Current Trends, Challenges and Implications / M. Mohan, G. Richardson, G. Gopan et al. // *Remote Sensing*. – 2021. – Vol. 13. – № 13. – Art. 2596. – DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13132596>.
18. Новые оптоэлектронные системы экспресс-анализа семян в лесохозяйственном производстве / С. В. Соколов [и др.] // *Лесотехнический журнал*. 2019; 9 (2): 5-13. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.2/1>. URL: <https://www.elibrary.ru/CNXAWZ>.
19. Performance of Scots pine seedlings from seeds graded by colour / V. A. Zelikov [et al.] // *Forests*. 2019; 10 (12): 1064. DOI 10.3390/F10121064.
20. How to Increase the Analog-to-Digital Converter Speed in Optoelectronic Systems of the Seed Quality Rapid Analyzer / S. V. Sokolov, V. V. Kamensky [et al.] // *Inventions*. – 2019. – Vol. 4, No. 4. – P. 61. – DOI <https://doi.org/10.3390/inventions4040061>. URL: <https://elibrary.ru/dkxphx>.
21. The Effect of Motion Time of a Scots Pine Single Seed on Mobile Optoelectronic Grader Efficiency: A Mathematical Patterning / M.V. Drapalyuk, O.R. Dornyak [et al.] // *Inventions*. – 2019. – Vol. 4. – № 4. – P. 55. – DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions4040055>.
22. Анализ операционных механизированных технологий сепарации семян при искусственном лесовосстановлении / М. В. Драпалюк [и др.] // *Лесотехнический журнал*. – 2018. – Т. 8, № 4(32). – С. 207-220. – DOI 10.12737/article_5c1a3237290288.22345283. – EDN AKVBNM.
23. Mechanization of coniferous seeds grading in Russia: a selected literature analysis / B.T. Ersson, V.V. Malyshev et al. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2020. – Vol. 595. – P. 012060. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/595/1/012060>.
24. 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>.
25. 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>.
26. How Can the Engineering Parameters of the NIR Grader Affect the Efficiency of Seed Grading? / P. Tylek et al. // *Agriculture*. – 2022. – Vol. 12. – № 12. – P. 2125. – DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12122125>.

27. The Root Collar Diameter Growth Reveals a Strong Relationship with the Height Growth of Juvenile Scots Pine Trees from Seeds Differentiated by Spectrometric Feature / P. Tylek, C.B. Mastrangelo et al. // *Forests*. – 2023. – Vol. 14. – № 6. – P. 1164. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f14061164>.
28. 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, No. 3. – P. 106. – DOI 10.3390/data4030106. – URL: <https://www.elibrary.ru/PAJOVZ>.
29. The role of forest reproductive material quality in forest restoration / V. Ivetić [et al.] // *Forestry Engineering Journal*. – 2019. – Vol. 9. – № 2. – P. 56-65. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.2/7>.
30. Новиков, А. И. Совершенствование технологии получения высококачественного лесосеменного материала : 05.21.01 : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Воронеж, 2021. – 32 с. – URL: <https://www.elibrary.ru/qgemiu>.
31. Прияткин, Н. С. Неинвазивная экспресс-оценка разнокачественности и хозяйственной пригодности семенного материала на основе использования инструментальных физических методов : дис. ... д-ра биол. наук. – СПб, 2024. – 253 с. – URL: <https://www.elibrary.ru/aseotz>.
32. Coat Colour Grading of the Scots Pine Seeds Collected from Faraway Provenances Reveals a Different Germination Effect / I. V. Bacherikov, D. E. Raupova, A. S. Durova [et al.] // *Seeds*. – 2022. – Vol. 1, No. 1. – P. 49-73. – DOI 10.3390/seeds1010006. – EDN JRLACA.
33. Adaptive measures: integrating adaptive forest management and forest landscape restoration / P. Spathelf, J. Stanturf, M. Kleine et al. // *Annals of Forest Science*. – 2018. – Vol. 75. – № 2. – P. 55. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0736-4>.
34. Climate warming-induced replacement of mesic beech by thermophilic oak forests will reduce the carbon storage potential in aboveground biomass and soil / J. Kasper, R. Weigel, H. Walentowski et al. // *Annals of Forest Science*. – 2021. – Vol. 78. – № 4. – P. 89. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-021-01081-0>.
35. Adaptive silviculture for climate change in the Great Lakes- St. Lawrence Forest Region of Canada: Background and design of a long-term experiment / N. Thiffault, J. Fera, M.K. Hoepting et al. // *The Forestry Chronicle*. – 2024. – Vol. 100. – № 2. – P. 155-164. – DOI: <https://doi.org/10.5558/tfc2024-016>.
36. Roitberg, B. Tree adaptive growth (TAG) model: a life-history theory-based analytical model for post-thinning forest stand dynamics / B. Roitberg, C. Li, R. Lalonde // *Frontiers in Plant Science*. – 2024. – T. 15. – № February. – C. 1-14. – DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1344883>.
37. Pardos, M. Adaptive Strategies of Seedlings of Four Mediterranean Co-Occurring Tree Species in Response to Light and Moderate Drought: A Nursery Approach / M. Pardos, R. Calama // *Forests*. – 2022. – Vol. 13. – № 2. – P. 154. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f13020154>.
38. Opportunities and limitations of thinning to increase resistance and resilience of trees and forests to global change / G. Moreau, C. Chagnon, A. Achim et al. // *Forestry: An International Journal of Forest Research*. – 2022. – № 95. – P. 595-615. – DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpac010>.
39. Prokhorova, N. To the question of improving the methods of adaptive forest management / N. Prokhorova, Z. Govedar // *Forestry Engineering Journal*. – 2021. – Vol. 11. – № 2. – P. 59-68. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.2/6>.
40. Multi-actor perspectives on afforestation and reforestation strategies in Central Europe under climate change / R. Hazarika, A. Bolte, D. Bednarova et al. // *Annals of Forest Science*. – 2021. – Vol. 78. – № 3. – P. 60. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-021-01044-5>.
41. Forest adaptation and restoration under global change / A. Bolte, S. Mansourian, P. Madsen и др. // *Annals of Forest Science*. – 2023. – T. 80. – № 1. – С. 6-9. – DOI: <https://doi.org/10.1186/s13595-022-01172-6>. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1186/s13595-022-01172-6>.

42. Desired REgeneration through Assisted Migration (DREAM): Implementing a research framework for climate-adaptive silviculture / A.A. Royo, P. Raymond, C.C. Kern et al. // *Forest Ecology and Management*. – 2023. – Vol. 546. – № October. – P. 121298. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121298>.

43. Peterson St-Laurent, G., Hagerman, S. & Kozak, R. What risks matter? Public views about assisted migration and other climate-adaptive reforestation strategies. *Climatic Change* 151, Pp. 573–587, (2018). <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2310-3>.

44. Muller, J.J. Forest adaptation strategies aimed at climate change: Assessing the performance of future climate-adapted tree species in a northern Minnesota pine ecosystem / J.J. Muller, L.M. Nagel, B.J. Palik // *Forest Ecology and Management*. – 2019. – Vol. 451. – P. 117539. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117539>.

45. Рекомендации по проектированию и технологиям лесоразведения в защитных лесах малолесной зоны европейской части России при облесении песков и овражно-балочных склонов : Методические рекомендации / Н. Е. Проказин, С. А. Родин, В. И. Казаков [и др.] ; Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства (ФБУ ВНИИЛМ). – Пушкино : Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, 2021. – 68 с. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/yraino>.

46. Simulating Growth and Competition on Wet and Waterlogged Soils in a Forest Landscape Model / E.J. Gustafson, B.R. Miranda, A.Z. Shvidenko, B.R. Sturtevant // *Frontiers in Ecology and Evolution*. – 2020. – Vol. 8. – № December. – P. 1-19. – DOI: <https://doi.org/10.3389/fevo.2020.598775>.

47. 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>.

48. 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>.

References

1. Novikova, T. P. Development of a reference information system for adaptive restoration of forest landscapes (FOR-library) // NIR: grant No. 23-26-00102. Russian Science Foundation. 2023. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53916036>.

2. Novikova, T. P. The choice of a set of operations for forest landscape restoration technology / T. P. Novikova // *Inventions*. – 2022. – Vol. 7, No. 1. – DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions7010001>.

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

4. Novikova T.P., Novikov A.I., Petrishchev E.P. (2023). FLR-Library reference information system for adaptive forest restoration: cluster analysis of descriptors. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 3 (51). P. 164-179. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2023.3/12. URL: <https://elibrary.ru/uzokyx>.

5. Novikova, T. P. The impact of climate change on reforestation management / T. P. Novikova, T. V. Novikova, A. I. Novikov // *Science and innovation in the modern world : Proceedings of the National Scientific and Practical Conference, Voronezh, January 22, 2024*. – Voronezh: Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, 2024. – pp. 53-58. – DOI 10.58168/SIMW2024_53-58. URL: <https://www.elibrary.ru/kokewa>.

6. Khanina, L.G. Classification of types of forest growing conditions by indicator species of Sparrow-vagrebnyak: database and experience of analysis of forest taxational data // *Issues of forest science*, No. 4. – 2019. DOI 10.31509/2658-607x-2019-2-4-1-28.

7. Express analysis of seeds in forestry production: theoretical and technological aspects / M.V. Drapalyuk [et al.]. – Voronezh : VSUFT, 2022. – 176 p. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48309574>.

8. 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>.
9. Development of an algorithm and a functional model of an information system for small agriculture / T.V. Novikova [et al.] // *Modeling of systems and processes*. – 2020. – Vol. 13, No. 4. P. 53-58. – DOI 10.12737/2219-0767-2021-13-4-53-58. - URL: <https://www.elibrary.ru/qdcyfv>.
10. Novikov, A.I. The effect of seed coat color grading on height of one-year-old container-grown Scots pine seedlings planted on post-fire site / A. I. Novikov, V. Ivetic // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. – Vol. 226, – Article 012043. – DOI 10.1088/1755-1315/226/1/012043.
11. Jančo, M., Danko, M., Sleziač, P., Holko, L. Estimation of the leaf area index in a decline spruce forest in the Western Tatra Mountains for determination of rainfall interception // *Acta Hydrologica Slovaca*, 2024; 25 (1): 106-114. DOI: <https://doi.org/10.31577/ahs-2024-0025.01.0012>.
12. Carbon emissions from selective logging in the southern Yucatan Peninsula, Mexico / S. Armenta-Montero, E.A. Ellis, P.W. Ellis et al. // *Madera y Bosques*. – 2020. – Vol. 26. – № 1. – DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2611891>.
13. Elias, B.C.H. The application of gap planting technology to rehabilitate degraded natural forest / Elias, B.C.H. Simangunsong // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2023. – Vol. 1220. – № 1. – P. 012029. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1220/1/012029>.
14. Patent 2714705 Russian Federation, IPC A 01 G 23/00. The method of forest restoration / Applicant and patent holder Voronezh. gosudarstvenny lesotekhn. un-T. – No. 2019115418 ; application dated 05/20/2019 ; publ. 02/19/2020, Issue No. 5. URL: <https://elibrary.ru/gzdlvj>.
15. Sokolov, S. Development tendency of sowing air operating technology by unmanned aerial vehicles in artificial reforestation / S. Sokolov [et al.] // *Forestry Engineering Journal*. – 2018. – Vol. 7. – № 4. – P. 190-205. – DOI: https://doi.org/10.12737/article_5a3d040dc79c79.94513194.
16. Novikov, A.I. Aerial seeding of forests in Russia: A selected literature analysis / A.I. Novikov, B.T. Ersson // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 226. – № 1. – Article 012051. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012051>.
17. 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. – Art. 2596. – DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13132596>.
18. Sokolov, S.V. New optoelectronic systems for express analysis of seeds in forestry production / S. 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>.
19. Performance of Scots pine seedlings from seeds graded by colour / V. A. Zelikov [et al.] // *Forests*. 2019; 10 (12): 1064. DOI 10.3390/F10121064.
20. How to Increase the Analog-to-Digital Converter Speed in Optoelectronic Systems of the Seed Quality Rapid Analyzer / S. V. Sokolov, V. V. Kamensky [et al.] // *Inventions*. – 2019. – Vol. 4, No. 4. – P. 61. – DOI <https://doi.org/10.3390/inventions4040061>. URL: <https://elibrary.ru/dkxphx>.
21. The Effect of Motion Time of a Scots Pine Single Seed on Mobile Optoelectronic Grader Efficiency: A Mathematical Patterning / M. V. Drapalyuk, O. R. Dorniyak [et al.] // *Inventions*. – 2019. – Vol. 4. – № 4. – P. 55. – DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions4040055>.
22. Analysis of operational mechanized technologies of seed separation under artificial forest restoration / M. V. Drapalyuk [et al.] // *Forestry Engineering Journal*. – 2018. – Vol. 8. – № 4. – P. 207-220. – DOI: https://doi.org/10.12737/article_5c1a3237290288.22345283.

23. Mechanization of coniferous seeds grading in Russia: a selected literature analysis / B.T. Ersson, V.V. Malyshev et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 595. – P. 012060. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/595/1/012060>.

24. 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>.

25. 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>.

26. How Can the Engineering Parameters of the NIR Grader Affect the Efficiency of Seed Grading? / P. Tylek et al. // Agriculture. – 2022. – Vol. 12. – № 12. – P. 2125. – DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12122125>.

27. The Root Collar Diameter Growth Reveals a Strong Relationship with the Height Growth of Juvenile Scots Pine Trees from Seeds Differentiated by Spectrometric Feature / P. Tylek, C.B. Mastrangelo et al. // Forests. – 2023. – Vol. 14. – № 6. – P. 1164. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f14061164>.

28. 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, No. 3. – P. 106. – DOI: [10.3390/data4030106](https://doi.org/10.3390/data4030106). – URL: <https://www.elibrary.ru/PAJOVZ>.

29. The role of forest reproductive material quality in forest restoration / V. Ivetić [et al.] // Forestry Engineering Journal. – 2019. – Vol. 9. – № 2. – P. 56-65. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.2/7>.

30. Novikov, A. I. Improvement of technology for obtaining high-quality forest seed material : 05.21.01 : abstract of the dissertation for the degree of Doctor of technical Sciences. – Voronezh, 2021. – 32 p. – URL: <https://www.elibrary.ru/qgemiu>.

31. Priyatkin, N. S. Noninvasive rapid assessment of the heterogeneity and economic suitability of seed material based on the use of instrumental physical methods : dissertation for the degree of Doctor of Biological Sciences. – St. Petersburg, 2024. – 253 p. – URL: <https://www.elibrary.ru/aseotz>.

32. Coat Colour Grading of the Scots Pine Seeds Collected from Faraway Provenances Reveals a Different Germination Effect / I. V. Bacherikov, D. E. Raupova, A. S. Durova [et al.] // Seeds. – 2022. – Vol. 1, No. 1. – P. 49-73. – DOI: [10.3390/seeds1010006](https://doi.org/10.3390/seeds1010006). – EDN JRLACA.

33. Adaptive measures: integrating adaptive forest management and forest landscape restoration / P. Spathelf, J. Stanturf, M. Kleine et al. // Annals of Forest Science. – 2018. – Vol. 75. – № 2. – P. 55. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0736-4>.

34. Climate warming-induced replacement of mesic beech by thermophilic oak forests will reduce the carbon storage potential in aboveground biomass and soil / J. Kasper, R. Weigel, H. Walentowski et al. // Annals of Forest Science. – 2021. – Vol. 78. – № 4. – P. 89. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-021-01081-0>.

35. Adaptive silviculture for climate change in the Great Lakes- St. Lawrence Forest Region of Canada: Background and design of a long-term experiment / N. Thiffault, J. Fera, M.K. Hoepfing et al. // The Forestry Chronicle. – 2024. – Vol. 100. – № 2. – P. 155-164. – DOI: <https://doi.org/10.5558/tfc2024-016>.

36. Roitberg, B. Tree adaptive growth (TAG) model: a life-history theory-based analytical model for post-thinning forest stand dynamics / B. Roitberg, C. Li, R. Lalonde // Frontiers in Plant Science. – 2024. – T. 15. – № February. – P. 1-14. – DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1344883>.

37. Pardos, M. Adaptive Strategies of Seedlings of Four Mediterranean Co-Occurring Tree Species in Response to Light and Moderate Drought: A Nursery Approach / M. Pardos, R. Calama // Forests. – 2022. – Vol. 13. – № 2. – P. 154. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f13020154>.

38. Opportunities and limitations of thinning to increase resistance and resilience of trees and forests to global change / G. Moreau, C. Chagnon, A. Achim et al. // Forestry: An International Journal of Forest Research. – 2022. – № 95. – P. 595-615. – DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpac010>.

39. Prokhorova, N. To the question of improving the methods of adaptive forest management / N. Prokhorova, Z. Govedar // *Forestry Engineering Journal*. – 2021. – Vol. 11. – № 2. – P. 59-68. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.2/6>.
40. Multi-actor perspectives on afforestation and reforestation strategies in Central Europe under climate change / R. Hazarika, A. Bolte, D. Bednarova et al. // *Annals of Forest Science*. – 2021. – Vol. 78. – № 3. – P. 60. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-021-01044-5>.
41. Forest adaptation and restoration under global change / A. Bolte, S. Mansourian, P. Madsen et al. // *Annals of Forest Science*. – 2023. – T. 80. – № 1. – С. 6-9. – DOI: <https://doi.org/10.1186/s13595-022-01172-6>. – URL: <https://doi.org/10.1186/s13595-022-01172-6>.
42. Royo, A.A. Desired REgeneration through Assisted Migration (DREAM): Implementing a research framework for climate-adaptive silviculture / A.A. Royo, P. Raymond, C.C. Kern et al. // *Forest Ecology and Management*. – 2023. – Vol. 546. – № October. – P. 121298. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121298>.
43. Peterson St-Laurent, G., Hagerman, S. & Kozak, R. What risks matter? Public views about assisted migration and other climate-adaptive reforestation strategies. *Climatic Change* 151, Pp. 573–587, (2018). <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2310-3>.
44. Muller, J.J. Forest adaptation strategies aimed at climate change: Assessing the performance of future climate-adapted tree species in a northern Minnesota pine ecosystem / J.J. Muller, L.M. Nagel, B.J. Palik // *Forest Ecology and Management*. – 2019. – Vol. 451. – P. 117539. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117539>.
45. Recommendations on the design and technologies of afforestation in the protective forests of the low-forest zone of the European part of Russia for afforestation of sands and ravine-girder slopes : Methodological recommendations / N. E. Prokazin, S. A. Rodin, V. I. Kazakov [et al.] ; All-Russian Scientific Research Institute of Forestry and Forestry Mechanization (FBU VNIILM). – Pushkino : All-Russian Scientific Research Institute of Forestry and Forestry Mechanization, 2021. – 68 p. – Access mode: <https://www.elibrary.ru/yraino>.
46. Simulating Growth and Competition on Wet and Waterlogged Soils in a Forest Landscape Model / E.J. Gustafson, B.R. Miranda, A.Z. Shvidenko, B.R. Sturtevant // *Frontiers in Ecology and Evolution*. – 2020. – Vol. 8. – December. – P. 1-19. – DOI: <https://doi.org/10.3389/fevo.2020.598775>.
47. 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>.
48. 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>.

Сведения об авторах

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

Новиков Артур Игоревич – доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1230-0433>, e-mail: arthur.novikov@vglta.vrn.ru.

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

Евдокимова Светлана Анатольевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры АПП, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-5559-4350>, e-mail: evdsv@mail.ru.

Information about the authors

✉ *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.

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

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

Svetlana A. Evdokimova – Cand. Sci. (Technical), Docent, Chair of the Department of Automation of production processes, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-5559-4350>, e-mail: evdsv@mail.ru.

✉ Для контактов | Corresponding author