

ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Научный журнал

2023 Том 13 № 4 (52) Часть 1

Учредитель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова» (ВГЛТУ)

Председатель редакционной коллегии

д.т.н., проф. М.В. Драпалюк

Главный редактор

д.т.н., проф. А.И. Новиков

Состав редакционной коллегии

д.с.-х.н., проф., академик РАН Н.Н. Дубенок (Россия)
д.с.-х.н., гл. науч. сотр., академик РАН К.Н. Кулик (Россия)
д.с.-х.н., проф., академик РАН А.А. Мартынюк (Россия)
д.б.н., проф., чл.-корр. РАН А.А. Сири (Россия) 2012-2023
д.т.н., проф. Д.Н. Афоничев (Россия)
д.т.н., проф. Е.В. Агеев (Россия)
д.т.н., проф. Л.И. Бельчинская (Россия)
д.ф.-м.н., проф. Н.Н. Матвеев (Россия)
д.б.н., проф. С.М. Матвеев (Россия)
д.б.н., проф. А.А. Гусев (Россия)
к.б.н., проф. К.В. Крутовский (Россия, Германия)
д.э.н., проф. С.С. Морковина (Россия)
д-р наук И. Ремеш (Чехия)
д.т.н., проф. А.М. Цыпук (Россия)
д.т.н., проф. В.А. Зеликов (Россия)
д.т.н., проф. О.Н. Бурмистрова (Россия)
д.т.н., проф. И.В. Григорьев (Россия)
д.с.-х.н., проф. А.С. Манаенков (Россия)
д.б.н., проф. В.В. Рубцов (Россия)
д.т.н., проф. В.С. Сюнёв (Россия)
д.б.н., проф. Н.Н. Харченко (Россия)
д-р наук, ст. науч. сотрудник
Клиссия Барбоза Мастранджело (Бразилия)
д-р наук, проф. П. Тылек (Польша)
д-р наук С.В. Ребко (Беларусь)
проф. Дингво Чжоу (КНР)
д-р наук, проф. А. Маркомини (Италия)
д-р наук, проф. В. Подразски (Чехия)
д-р наук, проф. Н. Билир (Турция)
д-р наук, проф. Я. Седлячик (Словакия)
д-р наук М. Ахмади-Афзади (Иран)
д-р наук, проф. В. Иветич (Сербия)
д-р наук, проф. Кью-Сак Кэнг (Республика Корея)
д-р наук А. Монтагноли (Италия)
д-р наук Янг Пэнг (КНР)
д-р наук, проф. З. Говедар (Босния и Герцеговина)
д-р наук, проф. А. Хэлуфи (Алжир)
д-р наук, проф. К. Палагиану (Румыния)

Редактор

к.ф.н. Е.А. Прыткова

Компьютерная верстка

к.ф.н. Е.А. Прыткова

Журнал зарегистрирован
Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных тех-
нологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-66384 от 14.07.2016 г.

Материалы настоящего журнала
могут быть воспроизведены только с
письменного разрешения
редакционной коллегии

РИО ФГБОУ ВО «ВГЛТУ»
394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8
телефон (473) 253-72-90
факс (473) 253-76-51
e-mail: lesteh@vglta.vrn.ru

© ФГБОУ ВО «ВГЛТУ», 2023

LESOTEKHNICHESKII ZHURNAL

Scientific Journal

2023 Vol. 13 № 4 (52) Part 1

Founder – Federal State Budget Educational Institution of High Education
«Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov» (VSUFT)

Editorial Board Head

Dr., prof. M.V. Drapalyuk

Editor-in-Chief

Dr., prof. A.I. Novikov

Members of editorial board

- Dr., prof., RAS academician N.N. Dubenok (Russia)
Dr., prof., RAS academician K.N. Kulik (Russia)
Dr., prof. RAS academician A.A. Martynyuk (Russia)
Dr., prof. A.A. Sirin (Russia) 2012-2023
Dr., prof. D.N. Afonichev (Russia)
Dr., prof. E.V. Ageev (Russia)
Dr., prof. L.I. Belchinskaya (Russia)
Dr., prof. N.N. Matveev (Russia)
Dr., prof. S.M. Matveev (Russia)
Dr., prof. A.A. Gusev (Russia)
Dr., prof. K.V. Krutovsky (Russia, Germany)
Dr., prof. S.S. Morkovina (Russia)
Dr. J. Remes (Czech Republic)
Dr., prof. V.A. Zelikov (Russia)
Dr., prof. A.M. Tsypuk (Russia)
Dr., prof. P. Tylek (Poland)
Dr., prof. O.N. Burmistrova (Russia)
Dr., prof. I.V. Grigoriev (Russia)
Dr., prof. A.S. Manaenkov (Russia)
Dr., prof. V.V. Rubtsov (Russia)
Dr., prof. V.S. Syunev (Russia)
Dr., prof. N.N. Kharchenko (Russia)
Dr. Clissia Barboza Mastrangelo (Brazil)
Dr. S.V. Rabko (Belarus)
Prof. Zhou Dingguo (PRC)
Dr., prof. A. Marcomini (Italy)
Dr., prof. V. Podrazsky (Czech Republic)
Dr., prof. N. Bilir (Turkey)
Dr., prof. J. Sedliacik (Slovakia)
Dr. M. Ahmadi-Afzadi (Iran)
Dr., prof. V. Ivetic (Serbia)
Dr., prof. Kyu-Suk Kang (Republic of Korea)
Dr. A. Montagnoli (Italy)
Dr. Yong Pang (PRC)
Dr., prof. Z. Govedar (Republic of Srpska/B&H)
Dr., prof. A. Kheloufi (Algeria)
Dr., prof. C. Palaghianu (Romania)

Editor

PhD in Philology E.A. Prytkova

Typesetting

PhD in Philology E.A. Prytkova

The journal is registered by
the Federal Service for Supervision
of Communications, Information Tech-
nology and Communications.

Registration certificate
PI № FS77-66384 of 14.07.2016

Materials of this journal may be repro-
duced only with written permission of the
editorial board

PS FSBEI HE «VSUFT»
394087, Voronezh, Timiryazeva str., 8,
telephone (473) 253-72-90,
fax (473) 253-76-51,
e-mail: lesteh@vglta.vrn.ru

© FSBEI HE «VSUFT», 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ И ЛЕС

Н.Н. Дубенок, А.В. Лебедев, В.В. Гостев. Модель образующей древесного ствола сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающей в Костромской области 5

Т.П. Новикова, А.И. Новиков, Е.П. Петрищев. Изучение спектрометрических особенностей лесных семян для улучшения посевных качеств: ретроспективный кластерный анализ направлений научного ландшафта 23

А.И. Тюрин, А.А. Самодуров, Д.Ю. Головин, М.А. Юнак, В.В. Коренков, П.А. Баранчиков, В.А. Тюрин, Н.М. Куркина. Исследование структуры и механических свойств годичных колец древесины дуба черешчатого (*Quercus robur*) методами наноиндентирования и скретч-теста 40

ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

М.И. Михайлова, М.П. Чернышов, С.В. Ребко. О лучших геоэкотипах сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) для искусственного лесовосстановления 58

О.С. Попов, С.В. Третьяков, А.С. Новосёлов. Лесоводственная эффективность проведения несплошной лесозаготовки древесины в сосняках после гидротехнической мелиорации в Сокольском районе Вологодской области 72

ТЕХНОЛОГИИ.

МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

В.О. Никонов, В.И. Посметьев, И.В. Сизмин, В.В. Посметьев, В.А. Зеликов, Н.В. Мозговой, П.В. Колодий. Имитационное моделирование работы рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства автопоезда с функцией самовытаскивания 92

Т.П. Новикова, А.И. Новиков, В.И. Лисицын, Е.П. Петрищев. Справочная информационная система FLR-Library для адаптивного лесовосстановления: информационная модель 114

Д.И. Рогачев, И.В. Козлов, В.Е. Клубничкин. Фильтрация шумов сканируемого LiDAR участка леса на основе цветовых моделей YCbCr и L*a*b* 125

CONTENTS

NATURAL SCIENCES AND FOREST

Dubенок N.N., Lebedev A.V., Gostev V.V. Model of stem taper of Scots pine (*Pinus sylvestris*) in the Kostroma region 5

Novikova T.P., Novikov A.I., Petrishchev E.P. Studying the spectrometric features of forest seeds to improve sowing qualities: a retrospective cluster analysis of the scientific landscape trends 23

Tyurin A.I., Samodurov A.A., Golovin D.Yu., Yunak M.A., Korenkov V.V., Baranchikov P.A., Tyurin V.A., Kurkina N.M. Study of the structure and mechanical properties of annual rings of pedunculate oak (*Quercus robur*) using nanoindentation and scratch test methods 40

NATURE MANAGEMENT

Mikhailova M.I., Chernyshov M.P., Rabko S.U. About the best geocotypes of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) for artificial reforestation 58

Popov O.S., Tretyakov S.V., Novoselov A.S. Silvicultural efficiency of the partial cut in pine forests after hydro technical reclamation in the Sokolsky district of the Vologda region 72

TECHNOLOGY.

MACHINERY AND EQUIPMENT

Nikonov V. O., Posmetev V. I., Sizmin I. V., Posmetev V. V., Zelikov V. A., Mozgovoi N. V., Kolodii P. V. The simulation modeling of the operation of a recuperative pneumohydraulic drawbar of a road train coupling device with a self-pulling function 92

Novikova T.P., Novikov A.I., Lisitsyn V.I., Petrishchev E.P. FLR-Library reference information system for adaptive forest restoration: the information model 114

Rogachev D.I., Kozlov I.V., Klubnichkin V.E. Noise filtering of the forest site scanned by LiDAR based on YCbCr and L*a*b* color models 125

ДЕРЕВОПЕРЕРАБОТКА.

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Л.В. Пономаренко, Е.В. Кантиева, А.С. Киреева.** Исследование прочности клеевого соединения при облицовывании щитовых деталей мебели каменным шпоном 140
- В.А. Мартынов, М.С. Лисятников, А.В. Лукина, С.И. Рощина.** Технология изготовления клееных деревянных конструкций с применением древесины, поврежденной огнем воздействием лесного пожара 158
- Н.С. Никулина, О.Р. Дорняк, А.И. Дмитренко, С.С. Никулин, К.В. Жужукин, Н.В. Черная.** Водопоглощение и разбухание древесины *Betula pendula* Roth, модифицированной олигомерами из побочных продуктов производства полибутадиена 178
- А.Д. Платонов, С.Н. Снегирева, Е.В. Кантиева, А.В. Киселева.** Влагопроводность ядровой древесины сосны, поврежденной сильным низовым и беглым верховым пожаром 191

ЭКОЛОГИЯ

- А.А. Кочубей, О.В. Черепанова, И.В. Петрова.** Дневная и сезонная динамика интенсивности транспирации вереска обыкновенного (*Calluna vulgaris* (L.) Hill) на юге ареала в Зауралье 209

WOOD PROCESSING.

CHEMICAL TECHNOLOGY

- Ponomarenko L.V., Kantieva E.V., Kireeva A.S.** Investigation of adhesive bond strength when facing furniture boards with flexible stone veneer 140
- Martinov V.A., Lisyatnikov M.S., Lukina A.V., Roshchina S.I.** Manufacturing technology of glued wooden structures with the use of wood damaged by the fire impact of a forest fire 158
- Nikulina N.S., Dornyak O.R., Dmitrenkov A.I., Nikulin S.S., Zhuzhukin K.V., Chernaya N.V.** Water absorption and swelling of *Betula pendula* Roth wood modified with oligomers from by-products of polybutadiene production 178
- Platonov A.D., Snegireva S.N., Kantieva E.V., Kiseleva A.V.** Heartwood moisture conductivity of standing pine damaged by running crown and strong surface wildfire 191

ECOLOGY

- Kochubey A.A., Cherepanova O.E., Petrova I.V.** Daily and season transpiration intensive of *Calluna vulgaris* (L.) Hill in the trans-Ural south area 209


Оригинальная статья



DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/3>


УДК 630*521+630*524



Модель образующей древесного ствола сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающей в Костромской области

Николай Н. Дубенок, ndubenok@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-9059-9023>

Александр В. Лебедев , alebedev@rgau-msha.ru  <https://orcid.org/0000-0002-8939-942X>

Владимир В. Гостев, v.gostev@rgau-msha.ru  <https://orcid.org/0000-0002-6843-3422>

ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева», ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127434, Российская Федерация

Модели образующей древесного ствола получили широкое распространение в лесохозяйственных исследованиях. Основывающиеся на уравнениях образующей модели объёма стволов способны с достаточной точностью определять сортиментный потенциал древостоев. Для Костромской области ранее не производились работы, направленные на моделирование образующей стволов. Поэтому целью исследования стал поиск и обоснование моделей образующей древесного ствола с одним уравнением, наиболее корректно описывающих изменение диаметра дерева с высотой в древостоях сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающих в Костромской области. В качестве экспериментальных данных получены 10064 измерений диаметра 692 деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Для проведения анализа отобраны 19 моделей образующих древесных стволов с одним уравнением. Статистические расчеты производились в среде Python. Рассчитанные значения метрик качества, графический анализ остатков и ошибок позволили установить, что наиболее адекватно образующие стволы сосновых древостоев Костромской области описывает трёхпараметрическая модель (RMSE = 1,384; MAPE = 8,928; MAE = 0,958 ; MBE = -0,095; R² = 0,984;). Предсказанный при помощи модели диаметр ствола на любой высоте позволяет, не прибегая к валке дерева, проводить анализ сортиментной структуры. Требуются дальнейшие исследования, направленные на разработку нормативов сортиментной структуры стволов, базирующихся на предложенном уравнении образующей.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, *Pinus sylvestris* L., форма ствола, образующая ствол, регрессионные модели, сосновые древостои, Костромская область

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-76-01016, <https://rscf.ru/project/23-76-01016/>.

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



Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.


Для цитирования: Дубенок Н. Н. Модель образующей древесного ствола сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающей Костромской области / Н. Н. Дубенок, А. В. Лебедев, В. В. Гостев // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 4 (52). – Ч. 1. – С. 5–22. – Библиогр.: с. 19–22 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/3>.

Поступила 16.11.2023. Пересмотрена 04.12.2023. Принята 05.12.2023. Опубликована онлайн 29.12.2023.

Model of stem taper of Scots pine (*Pinus sylvestris*) in the Kostroma region

Nikolay N. Dubenok, ndubenok@rgau-msha.ru  <https://orcid.org/0000-0002-9059-9023>

Aleksandr V. Lebedev , alebedev@rgau-msha.ru  <https://orcid.org/0000-0002-8939-942X>

Vladimir V. Gostev, v.gostev@rgau-msha.ru  <https://orcid.org/0000-0002-6843-3422>

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya str., 49, Moscow, 127434, Russian Federation

Abstract

Models of the stem taper have become widespread in forestry research. Models of the stem taper based on the equations of the stem taper are capable of determining with sufficient accuracy the assortment potential of forest stands. For the Kostroma region, no work has previously been carried out aimed at modeling the stem taper of trunks. Therefore, the goal of the study was to search and justify models of the stem taper of a tree trunk with one equation that most correctly describe the change in tree diameter with height in Scots pine stands growing in the Kostroma region. As experimental data, 10064 measurements of the diameter of 692 pine trees were obtained. To carry out the analysis, 19 models of tree stem taper with one equation were selected. Calculations were carried out in the Python environment. The calculated values of quality metrics, graphical analysis of residuals and errors made it possible to establish that the four-parameter model most adequately describes of the stem taper of pine forest stands in the Kostroma region. The stem diameter predicted using the model at any height makes it possible to analyze the assortment structure without resorting to tree felling. Further research is required aimed at developing standards for the assortment structure of trunks based on the proposed stem taper model.

Keywords: *trunk shape, steam taper, regression models, pine stands, Kostroma region*

Funding: This study has been supported by the grants the Russian Science Foundation, RSF 23-76-01016, <https://rscf.ru/en/project/23-76-01016/>.

Acknowledgments: Authors thanks the reviewers for their contribution to the peer review.

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

For citation: Dubenok N. N., Lebedev A. V., Gostev V. V. (2023). Modeling of stem taper of Scotch pine in the Kostroma region. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 4 (52), part 1, pp. 5-22 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/3>.

Received 16.11.2023. **Revised** 04.12.2023. **Accepted** 05.12.2023. **Published online** 29.12.2023.

Введение

Изменение диаметра ствола по его длине представляет собой образующую древесного ствола. Уравнение образующей является наиболее известной математической моделью сбега. Её применение позволяет интерпретировать древесный ствол как тело вращения, обладающее центральной осью, и предоставляет возможность перехода от объёмной пространственной модели к более простой плоской. Использование образующей является одним из наиболее важных и широко применяемых способов

прогнозирования объема ствола дерева [1]. Изучение образующей стволов лесобразующих пород по регионам в зависимости от таксационной характеристики древостоев позволяет решить многие задачи, связанные с точностью учёта объема древесины и выхода сортиментов.

Древесный ствол как тело вращения можно подразделить на четыре геометрические фигуры. У комля он близок к нейлоиду, в центральной части напоминает цилиндр и параболоид, вершинка дерева представляет собой конус. Диаметр ствола

уменьшается с увеличением высоты дерева, достигая нулевой отметки на вершине [2]. Изменение диаметра дерева по высоте ствола можно аппроксимировать посредством уравнений образующей, значительно представленных в литературе¹ [3-5,15-18]. Уравнения образующей древесного ствола в качестве зависимых переменных, как правило, включают диаметр на высоте 1,3 м (D), общую высоту дерева (H), а также высоту ствола, для которой прогнозируется значение диаметра (h) [6].

Среди множества уравнений образующей ствола выделяют модели одного уравнения, сегментированные модели и модели с переменным показателем степени². Модели одного уравнения наиболее просты и удобны для решения практических задач при таксации лесных насаждений [2,20]. В них образующая ствола на всем своем протяжении задается непрерывной математической функцией. Такие модели классифицируются в зависимости от количества оцениваемых параметров на однопараметрические, двухпараметрические и с большим количеством параметров³. Сегментированные уравнения определяют форму древесного ствола путём подгонки отдельного уравнения к каждому его сегменту, а затем алгебраического связывания их для получения общей сегментированной структуры [7,19]. В уравнениях образующей ствола с переменным показателем используется показатель степени, который изменяется при движении от комля к вершине, отражая различия между нейлоидными, параболоидными и конусообразными участками [6].

Вычисление объёма древесины методом интегрирования функций образующей стволов позволяет оценивать как объём всего ствола, так и отдельных сортиментов, что значительно упрощает процедуру сортиментации [8,9].

Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) является важной лесообразующей породой как для Костромской области, так и для европейской части России в целом. Сосновые насаждения обладают

огромным ресурсным потенциалом, а их средообразующие функции сложно переоценить [10,11]. Для оптимизации определения запасов древесных ресурсов и более точной их сортиментации, определения баланса углерода и количественных характеристик крупного детрита, а также ввиду распространения незаконных рубок требуется изучение формы стволов деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и разработка лесоинвентаризационных нормативов, базирующихся на уравнениях образующей стволов [12].

Целью исследования является поиск и обоснование моделей образующей древесного ствола с одним уравнением, наиболее корректно описывающих изменение диаметра дерева на всем протяжении длины ствола в древостоях сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.), произрастающих в Костромской области.

Материалы и методы

Объект и предмет исследований

В качестве объекта исследования определен сосновый древостой сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.), расположенный в Костромской области (58.181932, 43.602051, высота НУМ 109 м).

Предметом исследования представлены стволы растущих и срубленных деревьев сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.).

Сбор данных

Экспериментальными данными послужили результаты анализа стволов деревьев сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.). У растущих деревьев измерялся с помощью мерной вилки (Haglof Mantax Blue, точность измерения 0,1 см) диаметр на высоте груди (1,3 м). После валки ствол дерева очищали от веток и определяли его длину с помощью рулетки вальщика (Stihl 00008810801). Диаметры измерялись на секциях через каждые 2 м для крупномерных стволов и через 1 м для маломерных. По материалам полевых работ и архивным данным получены 10064 измерений диаметра для 692 деревьев *P. sylvestris* L.

¹ Батурин К. В., Стариков А.В. Анализ математических моделей образующих древесных стволов. Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015; 3 (5): 23-26. DOI: <https://doi.org/10.12737/16198>.

² Li C., Barclay H., Hugh H., Shongming H., Harinder G., Ghebremusse S. Sensitivity of predictions of merchantable tree height, log

production, and lumber recovery to tree taper. The Forestry Chronicle. 2013; 89: 741-752. DOI: <https://doi.org/10.5558/tfc2013-136>.

³ Lanssonova L.R., Ubialli J.A., Arce J., Pelissari A., Favalessa C., Drescher R. Evaluation of taper functions for diameter estimated of commercial forest species in amazon matogrossense biome. Floresta. 2013; 43: 205-214.

Размах диаметров на высоте 1,3 м составляет от 3,9 до 54,1 см, а высот – от 5,6 до 34,5 м. Возраст модельных деревьев составил от 10 до 148 лет. Полученные данные относятся к южнотаежному району европейской части Российской Федерации и характеризуют господствующие и согосподствующие деревья в насаждениях.

Анализ данных

Полученная выборка была распределена на шесть классов деревьев по таксационному диаметру с градацией 10 см (табл. 1). Наиболее представлены классы диаметра 10-20 см (230 деревьев), 20-30 см (184 дерева) и 30-40 см (139 деревьев). Для всего набора данных средний диаметр составил 24,9 см со стандартным отклонением 11,1 см; средняя высота – 23,0 м со стандартным отклонением 7,1 м; средний возраст – 65 лет со стандартным отклонением 28 лет. В целом распределение признаков деревьев в выборочной совокупности близко к нормальному. График рассеяния относительной высоты (h / H) по относительному диаметру (d / D) представлен на рис. 1.

Для проведения анализа по литературным источникам произведен отбор 19 моделей образующей древесных стволов с одним уравнением, включающих следующие показатели: d_i – диаметр дерева на высоте h_i , см; D – диаметр дерева на высоте 1,3 м, см; H – высота дерева, м; b – параметры модели. Число параметров отобранных моделей составило от 1 до 8 (табл. 2).

Отбор лучших моделей основывался на общепринятых метриках качества: квадратный корень из среднеквадратической ошибки ($RMSE$), средний процент абсолютной ошибки ($MAPE$), средняя абсолютная ошибка (MAE), ошибка среднего смещения (MBE), коэффициент детерминации (R^2), информационные критерии Акаике (AIC) и Байеса (BIC) [13].

Обработка экспериментальных данных и расчёт метрик качества моделей производились с использованием пакета `scipy.optimize.curve_fit` v. 1.10.1. в Python⁴.

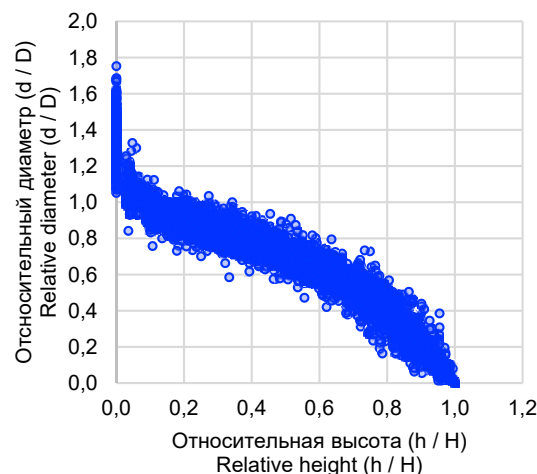


Рис. 1. График рассеяния относительной высоты (h / H) по относительному диаметру (d / D)
Figure 1. Scatter plot of the relative height (h / H) over relative diameter (d / D)

Источник: собственная композиция авторов
Source: author’s composition

Результаты

По результатам оценки параметров для 19 отобранных моделей образующей древесного ствола с одним уравнением составлена таблица 3, в которой представлены значения соответствующих им критериев качества. Оценки параметров для всех моделей статистически значимы на 5% уровне.

Отбор лучших моделей образующей строился на проверке выполнения следующих предпосылок: 1) функция модели образующей должна быть убывающей на протяжении всего древесного ствола, 2) а также быть универсальной (адекватно описывать весь ствол, а не отдельные его участки), 3) равенство диаметра на высоте груди и прогнозируемого по модели на срезе 1,3 м⁵.

⁴ Van Rossum. G. Python tutorial. Technical Report CS-R9526, Centrum voor Wiskunde en Informatica (CWI), Amsterdam. 1995. Режим доступа: <https://ir.cwi.nl/pub/5007>.

⁵ Gomat, H.Y., Deleporte, P., Moukini, R. et al. What factors influence the stem taper of Eucalyptus: growth, environmental conditions, or genetics?. *Annals of Forest Science*. 2011; 68: 109–120. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0012-3>.

Таблица 1

Описательная статистика данных измерений стволов *P. sylvestris* L. по классам диаметра

Table 1

Summary statistics for *P. sylvestris* L. taper dataset for each diameter class

Класс диаметра Diameter class	Число деревьев, шт. Number of trees, pcs.	Наименьший диаметр класса, см Smallest class diameter, cm	Средний диаметр класса, см Average class diameter, cm	Наименьшая высота класса, м Minimum class height, m	Средняя высота класса, м Average class height, m	Наименьший возраст класса, лет Minimum age of class, years	Средний возраст класса, лет Average class age, years
0-10	82	3,9	7,5	5,6	11,3	10,0	31,8
10-20	230	10,0	14,9	8,5	16,2	18,0	42,4
20-30	184	20,0	24,9	12,4	24,5	20,0	68,1
30-40	139	30,0	34,6	22,1	29,3	50,0	84,9
40-50	54	40,0	43,3	24,0	29,8	80,0	97,5
50-60	3	50,8	52,0	24,9	28,4	93,0	103,7

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

Таблица 2

Перечень анализируемых моделей образующих древесных стволов с одним уравнением

Table 2

List of selected models of stem taper with one equation

№	Уравнение The equation	Количество параметров Quantity parameters	Источник Source
1	$d_i = \sqrt{D^2 \left(\frac{H - h_i}{H - 1,3} \right)^{2-b_0}}$	1	Sharma M., Oderwald R.G. ⁶
2	$d_i = \sqrt{D^2 b_0 \left(1 - 2 \left(\frac{h_i}{H} \right) + \left(\frac{h_i}{H} \right)^2 \right)}$	1	Ormerod D. A. ⁷
3	$d_i = b_0 D \left(\frac{H - h_i}{H - 1,3} \right)^{b_1}$	2	Newberry J.D., Burkhart H.E. ⁸
4	$d_i = b_0 \left(1 - \left(\frac{h_i}{H} \right)^3 \right) + b_1 \log \left(1 - \frac{h_i}{H} \right)$	2	Pain O. Boyer E. ⁹

⁶Sharma M., Oderwald R.G. Dimensionally compatible volume and taper equations. Can. J. For. 2001; 31(5): 797–803. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-31-5-797>.

⁷ Ormerod D. A. Simple bole model. For. Chron.1973;49: 136–138.

⁸ Newberry J.D., Burkhart H.E. Variable-form stem profile models for loblolly pine. Canadian Journal Forest Research. 1986; 16: 109–114. DOI: <https://doi.org/10.1139/x86-018>.

⁹ Pain O. Boyer E. A whole individual tree growth model for Norway spruce. Workshop IUFRO S5. Nancy: INRI-Nancy. Topic 1. P. 01–04.

№	Уравнение The equation	Количество параметров Quantity parameters	Источник Source
5	$d_i = D \left(b_0 + b_1 \log \left(1 - \left(\frac{h}{H} \right)^{\frac{1}{3}} \right) \right) \left(1 - \exp \left(-\frac{b_0}{b_1} \right) \right)$	2	Biging G.S. ¹⁰
6	$d_i = D \left(1 - \left(\frac{h}{H} \right)^{b_0} \right)^{\frac{1}{b_1}}$	2	Forslund R. ¹¹
7	$d_i = \sqrt{b_0 D^2 \left(1 - \frac{h}{H} \right)^{b_1}}$	2	Reed D.D., Green E.J. ¹²
8	$d_i = \sqrt{D^2 \left(b_0 + b_1 \left(\frac{h_i}{H} \right) + b_2 \left(\frac{h_i^2}{H^2} \right) \right)}$	3	Kozak A., Munro D.D, Smith J.H.G. ¹³
9	$d_i = \sqrt{D^2 \left(\frac{H - h_i - b_0 + b_0 \exp \left(-\frac{(H-h_i)}{b_0} \right) + b_1 (H - h_i) \exp \left(-\frac{h_i}{b_2} \right)}{H - 1,3 - b_0 + b_0 \exp \left(-\frac{(H-1,3)}{b_0} \right) + b_1 (H - 1,3) \exp \left(-\frac{1,3}{b_2} \right)} \right)}$	3	Garcia O. ¹⁴
10	$d_i = D \left(b_0 \left(\frac{H - h_i}{H - 1,3} \right) \left(\frac{H}{1,3} \right)^{b_1 + b_2 \frac{h_i}{H} + b_3 \left(\frac{h_i}{H} \right)^2} \right)$	4	Sharma M., Parton J. ¹⁵
11	$d_i = D \left(b_0 + b_1 \left(\frac{1}{h_i + 1,3} \right)^{b_2} H^{b_3} \right)$	4	Demaerschalk J. P. ¹⁶ ; Moura J. B. ¹⁷
12	$d_i = \sqrt{b_0 D^2 \left(\frac{h}{1,3} \right)^{2 - \left(b_1 + b_2 \frac{h_i}{H} + b_3 \left(\frac{h_i}{H} \right)^2 \right)} \times \frac{H - h_i}{H - 1,3}}$	4	Sharma M., Zhang S.Y. ¹⁸
13	$d_i = D \left(\frac{H - h_i}{H - 1,3} \right)^{b_0 + b_1 \left(\frac{h_i}{H} - 1 \right) + b_2 \exp \left(b_3 \left(\frac{h_i}{H} \right) \right)}$	4	Newnham R.M. ¹⁹

¹⁰ Biging G.S. Taper equations for second-growth mixed conifers of Northern California. For. Sci. 1984; 30: 1103–1117.

¹¹ Forslund R. The power function as a simple stem profile examination tool. Can. J. For. Res. 1991; 21: 193–198. DOI: <https://doi.org/10.1139/x91-02>.

¹² Reed D.D., Green E.J. Compatible stem taper and volume ratio equations. For. Sci. 1984; 30: 977–990.

¹³ Kozak A., Munro D.D, Smith J.H.G. Taper functions and their application in forest inventory. For. Chron. 1969; 45: 278–283. DOI: <https://doi.org/10.5558/tfc45278-4>.

¹⁴ Garcia O. Dynamic modelling of tree form. Mathematical and Computational Forestry and Natural-Resource Sciences. 2015; 7: 39-15.

¹⁵ Sharma M., Parton J. Modeling stand density effects on taper for jack pine and black spruce plantations using dimensional analysis. For. Sci. 2009; 55: 268–282. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestscience/55.3.268>.

¹⁶ Demaerschalk J. P. Converting volume equations to compatible taper equations. Forest Science. 1972; 3: 241 – 245. Режим доступа: <https://www.sci-hub.ru/10.1139/x72-056>.

¹⁷ Moura J. B. Estudo da forma do fuste e comparação de métodos de estimativa volumétrica de espécies florestais da Amazônia brasileira. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 1994. 114 p.

¹⁸ Sharma M., Zhang S.Y. Variable-exponent taper equations for jack pine, blackspruce, and balsam fir in eastern Canada. For Ecol Manag. 2004; 198: 39–53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.03.035>.

¹⁹ Newnham R.M. Variable-form taper functions for four Alberta tree species. Canadian Journal of Forest Research. 1992; 22: 210–223. Режим доступа: https://digitalcommons.usu.edu/aspn_bib/2526/.

№	Уравнение The equation	Количество параметров Quantity parameters	Источник Source
14	$d_i = D \left(\frac{H - h_i}{H - 1,3} \right)^{\left(b_0 + b_1 \left(\frac{h_i}{H} \right)^{0,25} + b_2 \left(\frac{h_i}{H} \right)^{0,5} + b_3 \frac{D}{H} \right)}$	4	Zeng W.S., Liao Z.Y. ²⁰
15	$d_i = \sqrt{D^2 b_0 \left(\frac{H - h_i}{H - 1,3} \right) \left(\frac{h_i}{1,3} \right)^{2 - \left(b_1 + b_2 \left(\frac{h_i}{H} \right) + b_3 \left(\frac{h_i}{H} \right)^2 \right)}}$	4	Sharma M., Zhang S.Y. ¹⁶
16	$d_i = D \left(b_0 + b_1 \left(\frac{h_i}{H} \right) + b_2 \left(\frac{h_i}{H} \right)^2 + b_3 \left(\frac{h_i}{H} \right)^3 + b_4 \left(\frac{h_i}{H} \right)^4 \right)$	5	Ounekham K. ²¹
17	$d_i = D \left(b_0 + b_1 \left(\frac{H - h_i}{H - 1,3} \right) + b_2 \left(\frac{H - h_i}{H - 1,3} \right)^2 + b_3 \left(\frac{H - h_i}{H - 1,3} \right)^3 + b_4 \left(\frac{H - h_i}{H - 1,3} \right)^4 \right)$	5	Cervera J.M. ²²
18	$d_i = b_0 D^{b_1} \left(\frac{\left(1 - \left(\frac{h_i}{H} \right)^{1/4} \right)}{1 - 0,01^{1/4}} \right)^{b_2 + b_3 \left(1/e \frac{D}{H} \right) + b_4 D} \left(\frac{\left(1 - \left(\frac{h_i}{H} \right)^{1/4} \right)}{1 - 0,01^{1/4}} \right)^{b_5} \left(\frac{\left(1 - \left(\frac{h_i}{H} \right)^{1/4} \right)}{1 - 0,01^{1/4}} \right)^{\frac{D}{H}}$	6	Kozak A. ²³
19	$d_i = b_0 D^{b_1} b_2^D \left(1 - \sqrt{\left(\frac{h_i}{H} \right)} \right)^{\left(b_3 \left(\frac{h_i}{H} \right)^2 + \left(\frac{b_4}{\left(\frac{h_i}{H} \right)} \right) + b_5 D + b_6 H + b_7 \left(\frac{D}{H} \right) \right)}$	8	Muhairwe C.K. ²⁴

Источник: систематический поиск авторов

Source: systematic search for authors

Таблица 3

Оценки параметров моделей и значения метрик качества

Table 3

Estimates of model parameters and values of quality metrics

№ модели № model	Параметр Parameter	Оценка Grade	t-статистика t-statistic	Метрики качества моделей Model quality metrics						
				RMSE	MAPE	MAE	MBE	R ²	AIC	BIC
1	b ₀	0,751	1,592E+02	2,321	12,032	1,357	-0,535	0,956	15866	15874
2	b ₀	1,403	3,119E+02	3,232	19,038	2,597	-1,100	0,915	22101	22108
3	b ₀	1,052	7,826E+02	2,154	11,383	1,439	-0,063	0,962	14461	14476
	b ₁	0,679	2,621E+02							

²⁰ Zeng W.S., Liao Z.Y. A study on taper equation. 1997; 33: 127–132.

²¹ Ounekham K. Developing volume and taper equations for *Styrax tonkinensis* in Laos. M. Sc. Thesis. University of Canterbury New Zealand. 2009. 90 p.

²² Cervera J.M. El área basimétrica reducida, el volume reducido y el perfil. Montes. 1973; 174: 415-418. (In Spanish).

²³ Kozak A. My last words on taper equations. For. Chron. 2004; 80: 507–515. Doi: <https://doi.org/10.5558/tfc80507-4>.

²⁴ Muhairwe C.K. Taper equations for eucalyptus pilularis and eucalyptus grandis for the north coast in new south wales, Australia. For. Ecol. Manag. 1999; 113: 251–269.

Естественные науки и лес

№ модели № model	Параметр Parameter	Оценка Grade	t-статистика t-statistic	Метрики качества моделей Model quality metrics						
				RMSE	MAPE	MAE	MBE	R ²	AIC	BIC
4	b0	23,443	1,960E+02	8,717	59,843	6,743	-0,046	0,382	40798	40812
	b1	2,505	1,237E+01							
5	b0	1,033	2,994E+02	4,543	36,192	3,165	-0,152	0,832	28518	28533
	b1	0,562	1,187E+02							
6	b0	1,319	9,388E+01	2,476	11,052	1,422	-0,578	0,950	17089	17103
	b1	1,375	1,010E+02							
7	b0	0,659	5,212E+01	2,674	17,645	1,754	0,023	0,942	18534	18548
	b1	1,074	3,228E+02							
8	b0	0,742	1,349E+02	4,111	25,454	2,758	-0,613	0,863	26638	26660
	b1	-0,130	-6,126E+00							
	b2	-0,618	-3,634E+01							
9	b0	1,904	5,201E+01	1,384	8,928	0,958	-0,095	0,984	6134	6156
	b1	0,578	8,961E+01							
	b2	0,471	5,125E+01							
10	b0	1,101	7,943E+01	1,930	10,500	1,344	-0,027	0,970	12391	12419
	b1	-0,007	-1,741E+00							
	b2	-0,082	-1,915E+01							
	b3	0,387	6,580E+01							
11	b0	-4323,639	-5,200E-02	3,658	37,233	2,768	-0,099	0,891	24442	24471
	b1	4324,446	5,200E-02							
	b2	7,039	5,200E-02							
	b3	4,101	5,200E-02							
12	b0	0,969	5,859E+01	9,029	18,562	3,138	-2,191	0,337	41464	41492
	b1	2,000	6,057E+01							
	b2	-0,093	-7,060E-01							
	b3	0,330	2,545E+00							
13	b0	0,732	1,813E+02	1,563	8,905	0,999	-0,092	0,980	8422	8450
	b1	0,429	3,207E+01							
	b2	3,529	1,102E+02							
	b3	-10,554	-6,264E+01							
14	b0	2,850	9,403E+01	1,497	8,646	0,926	0,050	0,982	7604	7633
	b1	-8,517	-1,160E+02							
	b2	5,210	1,075E+02							
	b3	1,151	2,162E+02							
15	b0	0,969	5,859E+01	9,029	18,562	3,138	-2,191	0,337	41464	41492
	b1	2,000	6,057E+01							
	b2	-0,093	-7,060E-01							
	b3	0,330	2,545E+00							
16	b0	1,199	6,357E+02	1,637	9,243	1,162	-0,165	0,978	9296	9331
	b1	-3,252	-9,501E+01							
	b2	9,952	6,322E+01							
	b3	-13,577	-5,350E+01							

№ модели № model	Параметр Parameter	Оценка Grade	t-статистика t-statistic	Метрики качества моделей Model quality metrics						
				RMSE	MAPE	MAE	MBE	R ²	AIC	BIC
	b4	5,719	4,324E+01							
17	b0	0,024	6,109E+00	1,671	9,091	1,163	-0,029	0,977	9684	9720
	b1	1,451	3,011E+01							
	b2	1,850	-2,586E+01							
	b3	-5,950	-2,586E+01							
	b4	3,681	3,589E+01							
18	b0	1,402	9,173E+01	1,816	15,675	1,347	0,111	0,973	11251	11294
	b1	0,930	2,809E+02							
	b2	0,454	9,641E+01							
	b3	-0,086	-5,953E+00							
	b4	0,002	2,784E+01							
	b5	-0,302	-4,182E+01							
19	b0	1,199	4,669E+01	1,453	10,137	1,042	0,045	0,983	7053	7110
	b1	1,034	1,098E+02							
	b2	0,998	2,775E+03							
	b3	0,179	4,427E+01							
	b4	0,028	6,778E+01							
	b5	-0,010	-3,481E+01							
	b6	0,011	4,992E+01							
	b7	0,348	6,389E+01							

Примечание. RMSE – квадратный корень из среднеквадратической ошибки, MAPE – средний процент абсолютной ошибки, MAE – средняя абсолютная ошибка, MBE – ошибка среднего смещения, R² коэффициент детерминации, AIC - информационный критерий Акаике, BIC - информационный критерий Байеса.

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

Анализируя влияние количества параметров на степень соответствия фактическим данным, можно отметить, что с увеличением числа параметров ожидаемо возрастает и точность аппроксимации уравнениями фактических значений зависимой переменной. Однако увеличение количества параметров может также приводить к ухудшению обобщающей способности модели при ее использовании на новых данных. Уравнение № 19 с восемью параметрами показывает хорошие значения метрик качества за счет высокой степени подгонки к данным, использованным для вычисления оценок коэффициентов, но использование этой модели для других деревьев может приводить к значительным ошибкам.

Модели № 12 и 15 не способны предсказывать значения диаметра ствола на нулевом срезе у

комля, что противоречит предпосылке об универсальности уравнений. Вышеприведённые доводы позволяют исключить их из дальнейшего рассмотрения.

Трёхпараметрическая модель № 9 ($RMSE = 1,384$; $MAPE = 8,928$; $MAE = 0,958$; $MBE = -0,095$; $R^2 = 0,984$; $AIC = 6134$; $BIC = 6156$), четырёхпараметрические уравнение №14 ($RMSE = 1,497$; $MAPE = 8,655$; $MAE = 0,926$; $MBE = 0,051$; $R^2 = 0,982$; $AIC = 7603$; $BIC = 7632$), № 13 ($RMSE = 1,563$; $MAPE = 8,905$; $MAE = 0,999$; $MBE = -0,092$; $R^2 = 0,980$; $AIC = 8422$; $BIC = 8450$), а также функция с пятью параметрами № 16 ($RMSE = 1,637$; $MAPE = 9,243$; $MAE = 1,162$; $MBE = -0,165$; $R^2 = 0,978$; $AIC = 9296$; $BIC = 9331$) показали лучшие значения метрик качества среди остальных уравнений образующей и были отобраны для дальнейшего рассмотрения и оценки

адекватности аппроксимации диаметра в различных частях стволов деревьев, отличающихся по высоте.

Графические визуализации остатков моделей, признанных лучшими, в зависимости от значений предсказанного диаметра представлены на рис. 2. Анализируя полученные распределения остатков, можно отметить, что для всех отобранных моделей

характерна беспристрастность и постоянство дисперсии (гомоскедастичность остатков). Большинство точек данных моделей № 9, 13 и 14 выстраиваются вдоль оси абсцисс. Это говорит о том, что преобладающее число остатков близко к нулевой отметке и распределено ассиметрично.

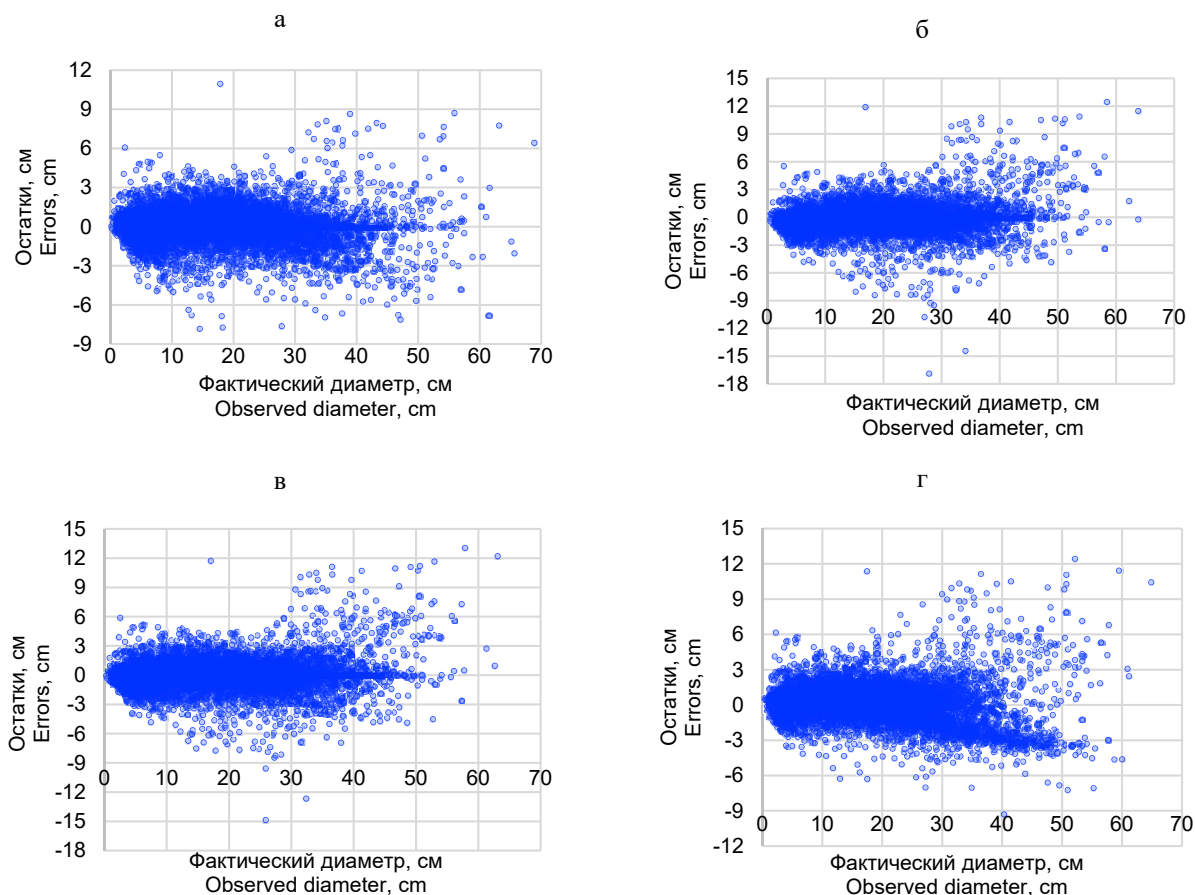


Рисунок 2. График зависимости остатков от фактических значений диаметра ствола *P. sylvestris* L. для моделей: а) № 9, б) № 14, в) № 13, г) № 16

Figure 2. Scatter plot of residuals versus actual *P. sylvestris* L. stem diameter values for models: а) № 9, б) № 14, в) № 13, г) № 16

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

На рис. 3 представлены прогнозируемые образующие стволы *P. sylvestris* L., построенные по предсказанным при помощи отобранных моделей значениям диаметров, в сравнении с фактическими величинами. Из выборки были отобраны самое низкое дерево, с диаметром на высоте груди 9,4 см и высотой 5,6 м, дерево средней величины с таксационным диаметром 21,9 см и высотой 23,0 м и самое высокое дерево с диаметром на высоте 1,3 м 39,1 см и высотой 34,5 м.

Обсуждение

Анализируя кривые образующей ствола, аппроксимированные с помощью отобранных уравнений, для самого низкого дерева (рис. 3а) можно отметить, что модели № 13 и 14 завышают значения диаметра в комле на уровне пня и до высоты 1,0 м. Модель № 9 даёт значительно меньшее расхождение с исходными данными. Уравнение № 16 достаточно точно предсказывает значения диаметра на нулевом срезе, но занижает их до высоты 3,0 м от комля, в отличие от моделей № 9, 13 и 14, показавших хорошее соответствие исходным данным. Для дерева, обладающего средней высотой (рис. 3б), все рассматриваемые модели хорошо описывают образующую комлевой, центральной частей ствола и у вершины, при этом можно отметить небольшое занижение значений диаметров на высоте от 15 до 20 м. Наилучшее совпадение с фактическими данными в данном случае показывают уравнение № 9, 13 и 14. Для ствола самого высокого дерева (рис. 3в), образующая, найденная при помощи уравнений № 9, 13 и 14, наиболее точно совпадает с кривой, построенной по исходным значениям диаметров. Модель № 16 наименее соответствует фактическим данным.

Для оценки величины отклонения предсказанных по моделям образующей значений диаметра от фактических данных были вычислены усредненные значения квадратного корня из среднеквадратической ошибки (*RMSE*) для различных групп относительных высот (рис. 4). Для группы относительных высот 0,0-0,1, относящейся к комлевой части ствола, наименьшая среднеквадратическая ошибка отмечается у модели № 9, максимальная – у модели № 16. По мере увеличения относительной высоты с

группы 0,1-0,2 значение квадратного корня из среднеквадратической ошибки моделей № 9, 13 и 14 распределяется относительно схожим образом и не превышает 1,6 см, достигая своего максимума в группе относительных высот 0,7-0,8 для функций № 13, 14 и в группе 0,8-0,9 для трёхпараметрического уравнения № 9.

Наибольшей величины второго максимума значений квадратного корня из среднеквадратической ошибки на относительной высоте 0,7-0,8 достигает уравнение № 13. Наивысших отметок усредненных значений *RMSE* достигает кривая, построенная при помощи модели № 16, которая в отличие от остальных функций, помимо наибольшего значения у нулевого среза и на относительной высоте 0,7-0,8 имеет ещё один максимум на высоте 0,2-0,3.

Трёхпараметрическое уравнение № 9 обладает вдвое меньшим значением *RMSE* в группе относительных высот 0,0-0,1 по сравнению с конкурирующими с ней по качеству уравнениями № 13 и 14, что позволяет считать её более универсальной и говорит о лучшем соответствии предсказанных ей значений диаметра исходным данным на всем протяжении ствола.

Таким образом, при моделировании образующей небольших деревьев, например, молодняков или насаждений низких классов бонитета, а также стволов средней высоты, наилучший результат возможно получить, применяя уравнение № 9. Однако моделирование образующей стволов более высоких деревьев *P. sylvestris* L., обладающих значительным объемом древесины и ресурсным потенциалом со сложной сортиментной структурой, наиболее важно при проведении лесоучётных работ в мезофильных и мезо-гигрофильных борах, субориях и сложных субориях, а наилучший результат в условиях Костромской области так же позволит получить универсальная трёхпараметрическая модель № 9, которая по результатам апробации на региональных данных и признана нами лучшей.

Предсказанные уравнением № 9 значения диаметра были сопоставлены с данными из таблиц сбега древесных стволов по разрядам высот²⁵. Различия между рассчитанными и табличными значе-

²⁵ Общесоюзные нормативы для таксации лесов : Справочник / [Загреб В. В. и др.]. Москва : Колос, 1992. 494.

ниями оценивались с помощью критериев достоверности (табл. 4). Расхождения от 7,3 до 11,6 % между табличными и предсказанными значениями наблюдаются для 1а, 1б, 2, 3 и 4 разрядов высот. Деревья этих разрядов как правило составляют основу лесосечного фонда и назначаются в рубку спелых перестойных насаждений. Увеличение расхождения

между диаметрами из таблиц сбег и аппроксимированными данными до 15,2% и 18,19% наблюдается соответственно в 5 и 5а разрядах высот. В эти разряды входят угнетённые деревья, произрастающие в насаждениях низкого класса бонитета, характеризующиеся низкосортной древесиной и не представляющие хозяйственную ценность.

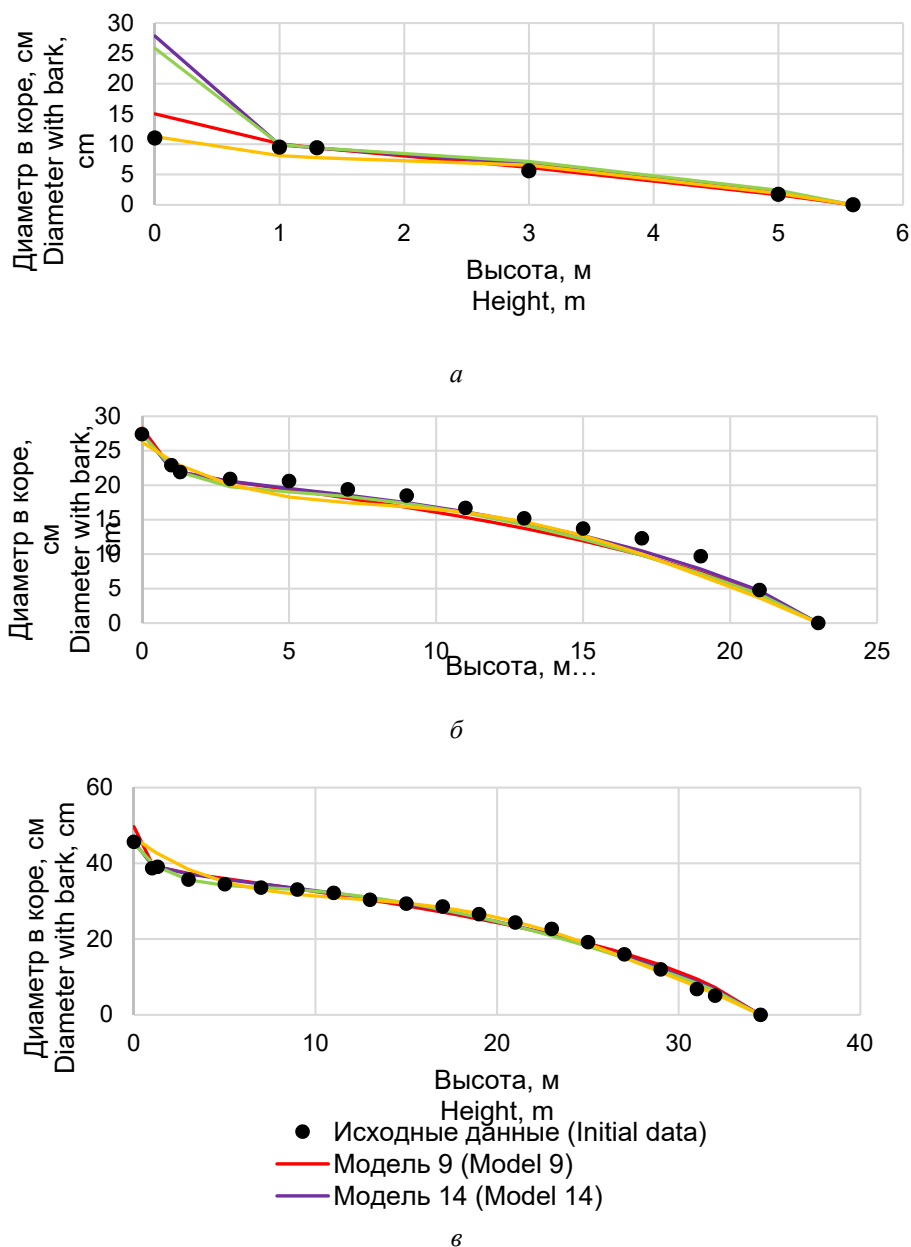


Рисунок 3. Кривые образующей ствола *P. sylvestris* L., аппроксимированные при помощи моделей и фактические значения диаметров: а) для самого низкого дерева ($D = 9,4$ см, $H = 5,6$ м), б) для дерева средней величины ($D = 21,9$ см, $H = 23,0$ м), в) для самого высокого дерева ($D = 39,1$ см, $H = 34,5$ м)

Figure 3. Prediction curves approximated using *P. sylvestris* L. stem taper model and actual measurement points: а) for the lowest tree ($D = 9,4$ cm, $H = 5,6$ m), б) for a medium-sized tree ($D = 21,9$ cm, $H = 23,0$ m), в) for the tallest tree ($D = 39,1$ cm, $H = 34,5$ m)

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

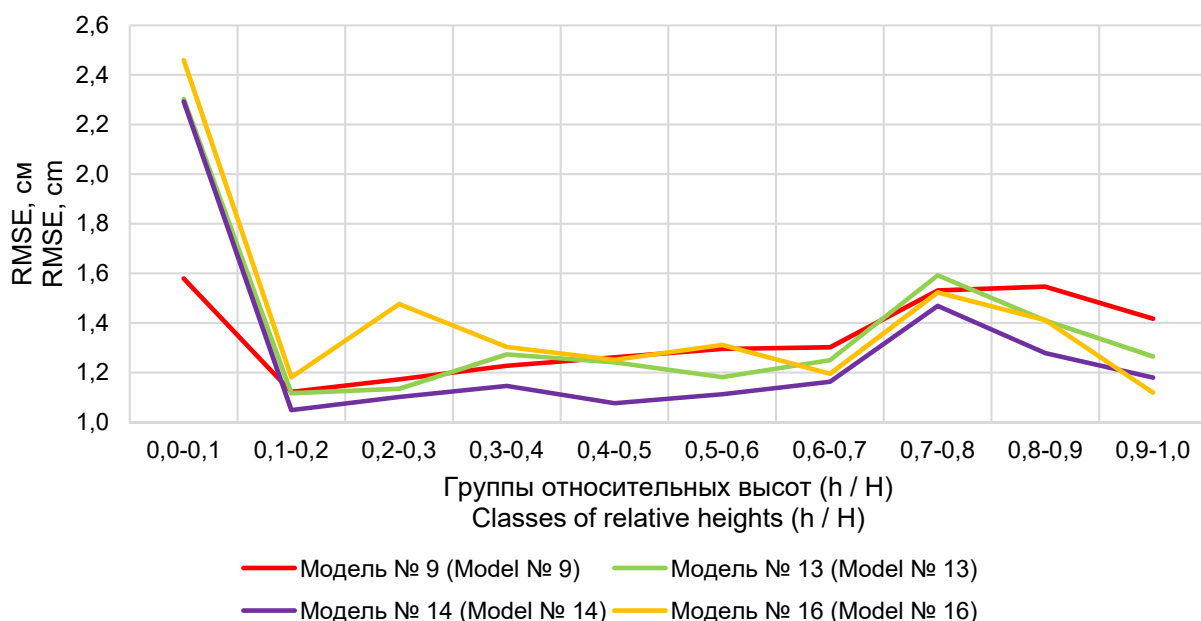


Рисунок 4. Изменение квадратного корня из среднеквадратической ошибки (*RMSE*) с относительной высотой для образующих стволов *P. sylvestris* L., построенных при помощи отобранных моделей

Figure 4. Variation of the square root of the root mean square error (*RMSE*) with relative height for the *P. sylvestris* L. stem tapper constructed using the selected models

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Таблица 4

Значения критериев достоверности, рассчитанные для соотношения диаметров, найденных по модели 14 и взятых из таблиц сбега древесных стволов *P. sylvestris* L. по разрядам высот

Table 4

Values of criteria qualities calculated for the ratio of diameters, found using models 14 and taken from tables of descending tree trunks by height categories.

Разряд высот Height category	RMSE	MBE	MAE	MAPE
1a	1,67	-0,92	1,37	7,31
1б	1,71	-0,96	1,42	8,45
1	2,06	-1,63	1,70	11,60
2	1,99	-1,54	1,63	9,35
3	1,43	-0,97	1,16	10,54
4	1,09	0,06	0,91	7,30
5	1,57	0,70	1,20	15,20
5a	2,14	1,13	1,72	18,19

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

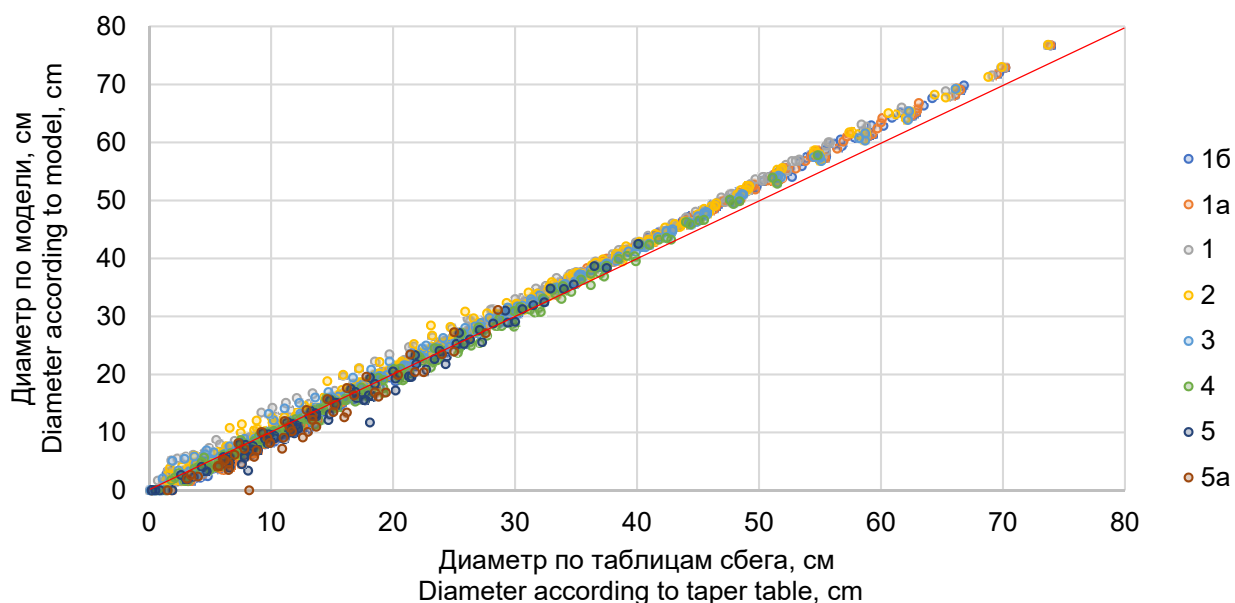


Рисунок 5. Сопоставление диаметров ствола *P. sylvestris* L. из таблиц сбега и рассчитанных с помощью модели по разрядам высот

Figure 5. Comparison of *P. sylvestris* L. stem diameters from trunk taper tables and heights calculated using the model

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Таблица 5

Таблица сбега стволов *P. sylvestris* L., составленная с использованием модели № 9

Table 5

P. sylvestris L. stem taper table compiled using model № 9

Высота, м Height, m	Относительные диаметры по относительным высота (h / H) Relative diameters by relative heights (h / H)											
	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95
8	1,452	1,222	1,094	0,959	0,865	0,774	0,676	0,569	0,451	0,319	0,170	0,088
10	1,395	1,154	1,041	0,932	0,850	0,765	0,673	0,571	0,457	0,327	0,176	0,092
12	1,361	1,111	1,011	0,918	0,842	0,762	0,674	0,576	0,464	0,336	0,184	0,096
14	1,339	1,080	0,991	0,910	0,838	0,761	0,676	0,581	0,472	0,344	0,190	0,101
16	1,323	1,057	0,979	0,904	0,835	0,760	0,678	0,585	0,478	0,352	0,197	0,105
18	1,311	1,040	0,970	0,901	0,833	0,760	0,679	0,589	0,484	0,359	0,203	0,109
20	1,303	1,026	0,964	0,898	0,832	0,760	0,681	0,592	0,489	0,365	0,209	0,113
22	1,295	1,016	0,960	0,896	0,831	0,760	0,682	0,595	0,493	0,371	0,214	0,116
24	1,290	1,007	0,956	0,894	0,830	0,760	0,683	0,597	0,497	0,375	0,219	0,120
26	1,285	1,000	0,954	0,893	0,829	0,760	0,684	0,599	0,500	0,380	0,223	0,123
28	1,281	0,994	0,952	0,892	0,829	0,760	0,685	0,601	0,503	0,384	0,227	0,126
30	1,277	0,990	0,950	0,891	0,828	0,760	0,686	0,602	0,505	0,387	0,231	0,129
32	1,274	0,986	0,948	0,890	0,828	0,760	0,686	0,604	0,508	0,390	0,235	0,132
34	1,272	0,983	0,947	0,889	0,827	0,760	0,687	0,605	0,510	0,393	0,238	0,134
36	1,270	0,980	0,946	0,889	0,827	0,760	0,687	0,606	0,511	0,396	0,241	0,137

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

На рис. 5 представлена графическая визуализация соотношения диаметров из таблиц сбега и рассчитанных с помощью модели по разрядам высот. Анализируя рисунок, можно отметить наличие расхождений между значениями диаметров из таблиц сбега по сравнению с данными модели для 1, 2, 3, 5 и 5а разрядов высот, что может привести к неточностям при определении объёмов стволов и их частей. Расхождения для 1б, 1а, 1 и 2 разрядов высот проявляются, главным образом, для диаметров в нижней части стволов: прогнозируемые по модели диаметру несколько выше табличных. Предложенная модель образующей апробирована на региональных данных и учитывает местные особенности древостоев, что обеспечивает более точную аппроксимацию значений диаметра на любой высоте.

С использованием апробированной функции № 9 была составлена таблица сбега (табл. 5), отражающая изменение относительных диаметров по относительным высотам от 0 до 0,95. Полученная таблица учитывает местные особенности роста и развития сосновых древостоев Костромской области и является альтернативой стандартным нормативам.

В условиях Костромской области предложенное уравнение образующей древесного ствола может стать основой для моделей сортиментной структуры стволов, которые будут применяться в качестве региональных нормативов для таксации сосновых древостоев без использования классических сортиментных таблиц. Предсказанный при помощи

модели № 9 диаметр ствола на любой высоте позволит, не прибегая к валке дерева и к его раскряжёвке, разбить ствол на сортименты и определить их объём.

Предложенная в работе методика позволяет выполнять моделирование образующей древесного ствола также для других древесных пород и лесорастительных условий, что планируется осуществить в будущем.

Требуются дальнейшие исследования, направленные на разработку модели сортиментной структуры стволов, базирующейся на предложенном уравнении образующей, что позволит получить качественные региональные таксационные нормативы и существенно увеличит точность определения выхода сортиментов для сосновых древостоев Костромской области.

Заключение

Для сосновых древостоев Костромской области предложена регрессионная модель образующей древесного ствола сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.), способная предсказывать (RMSE = 1,384; MAPE = 8,928; MAE = 0,958; MBE = -0,095; $R^2 = 0,984$;) величину диаметра ствола на любой высоте дерева.

Расчитанные значения метрик качества и результаты проведения анализа распределения среднеквадратической ошибки по группам относительных высот говорят об адекватности и эффективности рассматриваемой модели.

Список литературы

1. Петровский В. С., Малышев В.В., Мурзинов Ю.В. Моделирование параметров древесных стволов в насаждении. Лесотехнический журнал. 2012; 4(8): 18-22. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18814608>.
2. Scolforo H., McTague J., Burkhart H., Roise J., Carneiro R., Stape J. Generalized stem taper and tree volume equations applied to eucalyptus of varying genetics in Brazil. Canadian Journal of Forest Research. 2018; 49. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2018-0276>.
3. Choochuen T., Suksavate W., Meunpong P. Development of a Taper Equation for Teak (*Tectona grandis* L.f.) Growing in Western Thailand. Environment and Natural Resources Journal. 2021; 19. DOI: <https://doi.org/10.32526/enrj/19/2020183>.
4. Забавская Л. Н., Вайс А.А. Параметры образующей функции "Harris" и форма нижней части деревьев сосны. Хвойные бореальной зоны. 2021; 39 (2): 95-101. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46216526>.
5. Черных В. Л., Черных Л. В., Черных Д. В., Денисов С. А. Модель сбега комлевой части стволов основных древесных пород хвойно-широколиственных лесов Среднего Поволжья. Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2022; 2(54): С. 40-54. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2022.2.40>.

6. Zapata M., Bullock B., Montes C. A Taper Equation for Loblolly Pine Using Penalized Spline Regression. *Forest Science*. 2021; 67. DOI: <https://doi.org/10.1093/forsci/fxaa037>.
7. Ulak S., Ghimire K., Gautam R., Bhandari S., Poudel K., Timilsina Y., Pradhan D., Subedi T. Predicting the upper stem diameters and volume of a tropical dominant tree species. *Journal of Forestry Research*. 2022; 33. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-022-01458-5>.
8. Alkan O., Ozelik R. Stem taper equations for diameter and volume predictions of *Abies cilicica* Carr. in the Taurus Mountains, Turkey. *Journal of Mountain Science*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11629-020-6071>.
9. H. Sagvan M., Ibrahim S., Hakeem K, Kamziah Abd Kudus K. Development of Volume Function for Final Felling of *Pinus brutia* Ten in Kurdistan Iraq. *Environmental Analysis & Ecology Studies*. 2018; 3. DOI: <https://doi.org/10.31031/EAES.2018.03.000554>.
10. Dubenok N.N., Lebedev A.V., Gostev V.V., Gemonov A.V., Gradusov V.M. Height-Diameter fixed effects models for the pine in European Russia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022; 1154: 012025. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1154/1/012025>.
11. Дубенок Н.Н., Лебедев А.В., Гостев В.В. Регрессионные модели смешанных эффектов зависимости высоты от диаметра ствола в сосновых древостоях европейской части России. *Лесной вестник / Forestry Bulletin*. 2023; Т. 27.; 5: 37–47. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2023-5-37-47>.
12. Кузьмичев В. В., Лебедев А.В. Закономерности изменения размеров и качества древесины деревьев в лесах Европейской России (по материалам А.А. Крюденера). Кологрив : Федеральное государственное бюджетное учреждение "Государственный природный заповедник "Кологривский лес" имени М.Г. Синецкого". 2022. 96 с. ISBN 978-5-9500560-3-1. EDN ARPHRI. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49373785>.
13. Дубенок Н.Н., Кузьмичев В.В., Лебедев А.В. Модель смешанных эффектов зависимости высот от диаметров деревьев в сосновых древостоях. *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2021; 237: 59-74. DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2021.237.59-74>.
14. Lebedev A., Gostev V., Gemonov A. [et al.]. Two-parameters single equation stem taper models of *Pinus sibirica* in Siberia, Russia. *E3S Web of Conferences EBWFF 2023 - International Scientific Conference Ecological and Biological Well-Being of Flora and Fauna (Part 1)*. 2023; 420. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342001024>.
15. MacFarlane D. W., Crawford D., Jovanovic T., Frank J., Brack C. Comparing mobile and terrestrial laser scanning for measuring and modelling tree stem taper. *Forestry: An International Journal of Forest Research*. 2023; 96 (5): 705-717. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/epad012>.
16. Bilous A., Myroniuk V., Svyinchuk V., Soshenskyi O., Lesnik O., Kovbasa Ya. Semi-empirical estimation of log taper using stem profile equations. *Journal of Forest Science*. 2021; 67: 318-327. DOI: <https://doi.org/10.17221/209/2020-JFS>.
17. Zhang S., Sun J., Duan A., Zhang J., Variable-Exponent Taper Equation Based on Multilevel Nonlinear Mixed Effect for Chinese Fir in China. *Forests*. 2021; 12 (2): 126. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12020126>.
18. McTague J., Weiskittel A. Evolution, history, and use of stem taper equations: A review of their development, application, and implementation. *Canadian Journal of Forest Research*. 2020; 51. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0326>.
19. Santiago G., Larreta J., Cárdenas M., Quiñonez-Barraza G. Función ahusamiento-volumen comercial de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. en varias regiones de México. *Colombia forestal*. 2022; 25. 77-94. DOI: <https://doi.org/10.14483/2256201X.17814>.
20. Stenman V., Kangas A., Holopainen M. Upper stem diameter and volume prediction strategies in the National Forest Inventory of Finland. 2023; 57 (3). DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.23021>.

References

1. Petrovskij V. S., Malyshev V.V., Murzinov Yu.V. Modelirovanie parametrov drevesnyh stvolov v nasazhdenii. [Modeling the parameters of tree trunks in a forest stand]. *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering journal*. 2012; 4(8): 18-22. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18814608>.
2. Scolforo H., McTague J., Burkhart H., Roise J., Carneiro R., Stape J. Generalized stem taper and tree volume equations applied to eucalyptus of varying genetics in Brazil. *Canadian Journal of Forest Research*. 2018; 49. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2018-0276>.
3. Choochuen T., Suksavate W., Meunpong P. Development of a Taper Equation for Teak (*Tectona grandis* L.f.) Growing in Western Thailand. *Environment and Natural Resources Journal*. 2021; 19. DOI: <https://doi.org/10.32526/enrj/19/2020183>.
4. Zabavskaya L. N., Vajs A.A. Parametry obrazuyushchej funkcii "Harris" i forma nizhnej chasti derev'ev sosny. [Parameters of the Harris generating function and the shape of the lower part of pine trees]. *Hvojnje boreal'noj zony = Conifers of the boreal zone*. 2021; 39 (2): 95-101. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46216526>.
5. Chernyh V. L., Chernyh L. V., Chernyh D. V., Denisov S. A. Model' sbega komlevoj chasti stvolov osnovnyh dre-vesnyh porod hvojno-shirokolistvennyh lesov Srednego Povolzh'ya. [Model of the runoff of the butt part of the trunks of the main tree species of coniferous-broad-leaved forests of the Middle Volga region.]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie = Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Forest. Ecology. Nature management*. 2022; 2(54): C. 40-54. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2022.2.40>.
6. Zapata M., Bullock B., Montes C. A Taper Equation for Loblolly Pine Using Penalized Spline Regression. *Forest Science*. 2021; 67. DOI: <https://doi.org/10.1093/forsci/fxaa037>.
7. Ulak S., Ghimire K., Gautam R., Bhandari S., Poudel K., Timilsina Y., Pradhan D., Subedi T. Predicting the upper stem diameters and volume of a tropical dominant tree species. *Journal of Forestry Research*. 2022; 33. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-022-01458-5>.
8. Alkan O., Ozcelik R. Stem taper equations for diameter and volume predictions of *Abies cilicica* Carr. in the Taurus Mountains, Turkey. *Journal of Mountain Science*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11629-020-6071-1>.
9. H. Sagvan M., Ibrahim S., Hakeem K., Kamziah Abd Kudus K. Development of Volume Function for Final Felling of *Pinus brutia* Ten in Kurdistan Iraq. *Environmental Analysis & Ecology Studies*. 2018; 3. DOI: <https://doi.org/10.31031/EAES.2018.03.000554>.
10. Dubenok N.N., Lebedev A.V., Gostev V.V., Gemonov A.V., Gradusov V.M. Height-Diameter fixed effects models for the pine in European Russia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022; 1154: 012025. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1154/1/012025>.
11. Dubenok N.N., Lebedev A.V., Gostev V.V. Regressionnyye modeli smeshannyh effektov zavisimosti vyso-ty ot diametra stvola v sosnyh drevostoyah evropejskoj chasti Rossii. [Mixed-effect regression models of height versus trunk diameter dependence in pine stands in european part of Russia]. *Лесной вестник = Forestry Bulletin*. 2023; Т. 27.; 5: 37–47. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2023-5-37-47>.
12. Kuz'michev V. V., Lebedev A.V. Zakonomernosti izmeneniya razmerov i kachestva drevesiny derev'ev v lesah Evropejskoj Rossii (po materialam A.A. Kryudenera) [Patterns of changes in the size and quality of tree wood in the forests of European Russia (based on materials from A.A. Krudener)]. *Kologriv : Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethnoe uchrezhdenie "Gosudarstvennyj prirodnyj zapovednik "Kologrivskij les" imeni M.G. Sinicya" = Kologriv: Nature Reserve «Kologrivsky les»*. 2022. (In Russ.). 96 с. ISBN 978-5-9500560-3-1. EDN ARPHRI. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49373785>.
13. Dubenok N.N., Kuz'michev V.V., Lebedev A.V. Model' smeshannyh effektov zavisimosti vysot ot diametrov derev'ev v sosnyh drevostoyah. [Model of mixed effects of height dependence on tree diameters in pine stands.] *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii = News of the St. Petersburg Forestry Academy*. 2021; 237: 59-74. DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2021.237.59-74>.

14. Lebedev A., Gostev V., Gemonov A. [et al.]. Two-parameters single equation stem taper models of *Pinus sibirica* in Siberia, Russia. E3S Web of Conferences EBWFF 2023 - International Scientific Conference Ecological and Biological Well-Being of Flora and Fauna (Part 1). 2023; 420. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342001024>.
15. MacFarlane D. W., Crawford D., Jovanovic T., Frank J., Brack C. Comparing mobile and terrestrial laser scanning for measuring and modelling tree stem taper. *Forestry: An International Journal of Forest Research*. 2023; 96 (5): 705-717. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpad012>.
16. Bilous A., Myroniuk V., Svyinchuk V., Soshenskiy O., Lesnik O., Kovbasa Ya. Semi-empirical estimation of log taper using stem profile equations. *Journal of Forest Science*. 2021; 67: 318-327. DOI: <https://doi.org/10.17221/209/2020-JFS>.
17. Zhang S., Sun J., Duan A., Zhang J., Variable-Exponent Taper Equation Based on Multilevel Nonlinear Mixed Effect for Chinese Fir in China. *Forests*. 2021; 12 (2): 126. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12020126>.
18. McTague J., Weiskittel A. Evolution, history, and use of stem taper equations: A review of their development, application, and implementation. *Canadian Journal of Forest Research*. 2020; 51. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0326>.
19. Santiago G., Larreta J., Cárdenas M., Quiñonez-Barraza G. Función ahusamiento-volumen comercial de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. en varias regiones de México. *Colombia forestal*. 2022; 25. 77-94. DOI: <https://doi.org/10.14483/2256201X.17814>.
20. Stenman V., Kangas A., Holopainen M. Upper stem diameter and volume prediction strategies in the National Forest Inventory of Finland. 2023; 57 (3). DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.23021>.

Сведения об авторах

Дубенок Николай Николаевич – академик РАН, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой сельскохозяйственных мелиораций, ФГБОУ ВО Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, Российская Федерация, 127434, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9059-9023>, e-mail: ndubenok@rgau-msha.ru.

✉ *Лебедев Александр Вячеславович* – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры землеустройства и лесоводства, ФГБОУ ВО Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, Российская Федерация, 127434, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8939-942X>, e-mail: alebedev@rgau-msha.ru.

Гостев Владимир Викторович – ассистент кафедры землеустройства и лесоводства, ФГБОУ ВО Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, Российская Федерация, 127434, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6843-3422>, e-mail: v.gostev@rgau-msha.ru.

Information about the authors

Nikolay N. Dubenok – DSc (Agriculture), professor, academician of RAS, head of the department of Agricultural Reclamation, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya str. 49, Moscow, Russian Federation, 127434, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9059-9023>, e-mail: ndubenok@rgau-msha.ru.

✉ *Aleksandr V. Lebedev* – PhD (Agriculture), associate professor of the department of Land Management and Forestry, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya str. 49, Moscow, Russian Federation, 127434, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8939-942X>, e-mail: alebedev@rgau-msha.ru.

Vladimir V. Gostev – Assistant of the department of Land Management and Forestry, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya str. 49, Moscow, Russian Federation, 127434, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6843-3422>, e-mail: v.gostev@rgau-msha.ru.

✉ – Для контактов | Corresponding author


Научный обзор


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



УДК 630*232.3



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

Татьяна П. Новикова, novikova_tp.vglta@mail.ru  <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>

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

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

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

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

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

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


Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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



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

Review

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

Tatyana P. Novikova, novikova_tp.vglta@mail.ru  <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>

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

Abstract

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

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

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

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

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

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

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

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

Введение

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

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

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

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

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

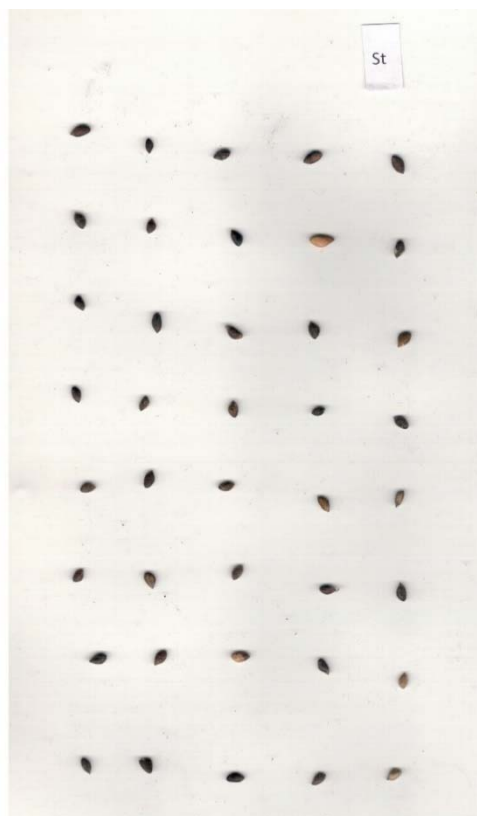


Рисунок 1. Образец дорсального изображения группы из 40 семян (*P. sylvestris*, var. *Negorelskaya*), созданный с помощью планшетного сканера (азрешение 300 dpi, область сканирования 1718*3309 pix, TIFF-формат), расположенных в порядке, соответствующем последующему высеву в 25 контейнер

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

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

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

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

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

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

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

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

семенами лучшим рабочим режимом является коэффициент отражения.

Материалы и методы

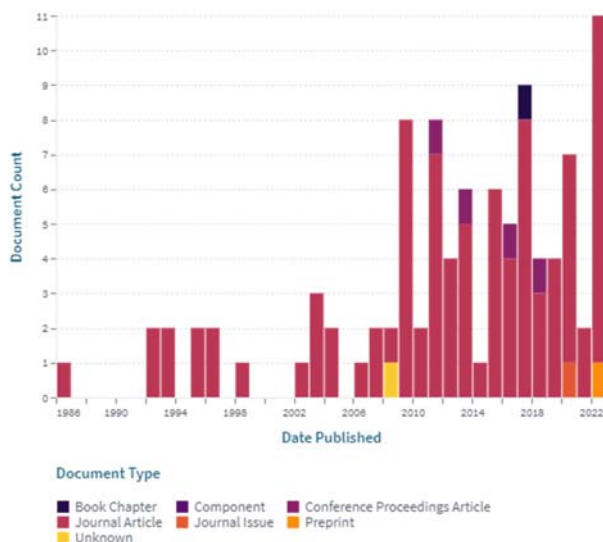
Предмет и объект исследований

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

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

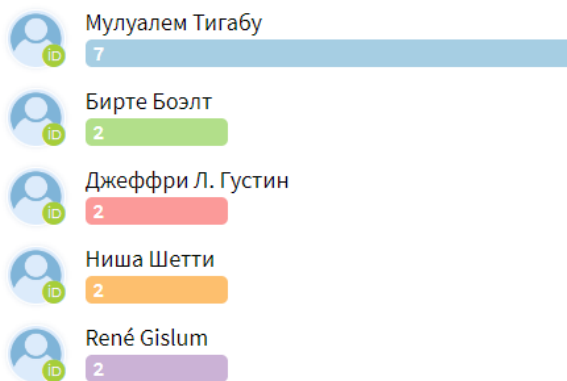
Сбор данных

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



a | a

Профили известных авторов



b | b

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

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

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

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

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

Таблица 1

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

Table 1

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

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

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Анализ данных

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

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

Результаты

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

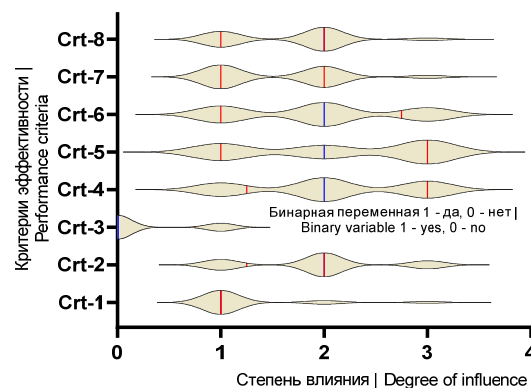


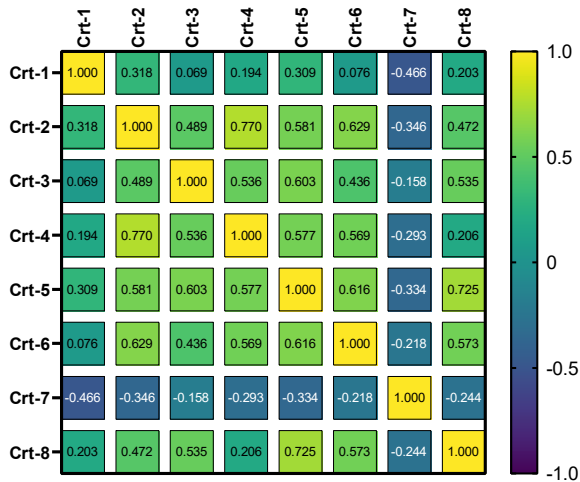
Рисунок 3. Виолин-плот критериев эффективности из таблицы 1 изучения спектрометрических свойств лесных семян в зависимости от степени влияния (1 – слабое, 2 – умеренное, 3 – сильное): красная вертикальная линия – 25 и 75 процентиля; синяя линия – медиана

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

Источник: собственная композиция авторов

Source: own composition

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



a | *a*

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

b | *b*

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

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

Источник: собственная композиция авторов
Source: own composition

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

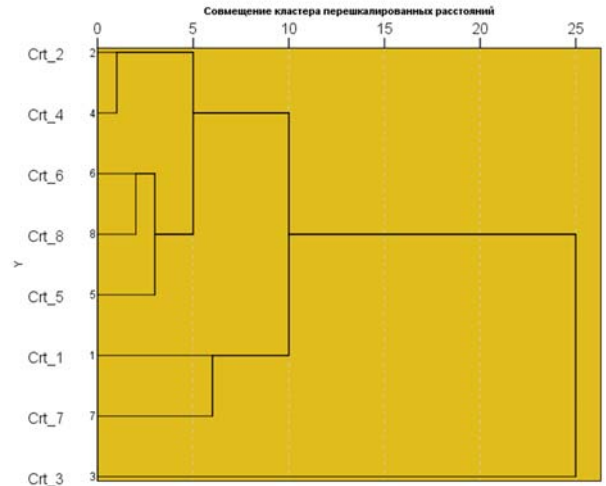


Рисунок 3. Кластеризация критериев эффективности изучения спектрометрических свойств лесных семян

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

Обсуждение

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Выводы

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

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

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

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

Список литературы | References

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

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

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

4. Novikov, A.I. Express analysis of forest seeds by biophysical methods – Voronezh : Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 2018. – 128 p. – URL: <https://elibrary.ru/yzuzgx>.
5. The effect of the individual seed mass of Negorelskaya variety Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) on 30-day germination in 40-cell SideSlit growing containers / S. Rabko et al. // *Forestry Engineering Journal*. – 2023. – Vol. 13. – № 2. – P. 59-86. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/4>.
6. The study of spectrometric parameters of seeds as the basis for the intensification of the process of reforestation of Scots pine cultivars of the “Negorelskaya” variety : grant RCF 23-26-00228. – M. : RCF, 2023. – URL: <https://elibrary.ru/jtyxux>.
7. The influence of the climatic index of degree days on the vitality of 3-year-old seedlings of scots pine from seeds sorted by spectrometric properties / V.I. Malysheva et al. // *Лесотехнический журнал*. – 2022. – Vol. 12. – № 1. – P. 110-118. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.1/9>.
8. Rebko, S.V. The variety of common pine “Negorelskaya” in Belarus: the first, the only, unique / S.V. Rebko, L.F. Poplavskaya, V.N. Balanchuk // *Forest resources - Belarusian polesie : proceedings of the international conference of young scientists, Gomel, September 24-27, 2018*. – Gomel : Beldruk Printing House LLC, 2018. – P. 66-68. – URL: <https://elibrary.ru/suuwhw>.
9. Sviridov, L.T. The historical aspect of the problem of sorting forest seeds // *Forest in the life of the Eastern Slavs: from Kievan Rus to the present day*. – Gomel : FI NAS B, 2003. – P. 186-190. URL: <https://elibrary.ru/tskkl1>.
10. Sviridov, L.T. Promising technical means for processing coniferous seeds / L.T. Sviridov, N.D. Gomzyakov // *Forestry*. – 2007. – Vol. 2. – P. 44-46. URL: <https://elibrary.ru/hzdxmt>.
11. Andivia, E. How can my research paper be useful for future meta-analyses on forest restoration plantations? / E. Andivia, P. Villar-Salvador, J.A. Oliet et al. // *New Forests*. – 2019. – Vol. 50. – № 2. – P. 255-266. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-018-9631-y>.
12. Bernardes, R.C. Deep-Learning Approach for Fusarium Head Blight Detection in Wheat Seeds Using Low-Cost Imaging Technology / R.C. Bernardes, A. De Medeiros, L. da Silva et al. // *Agriculture*. – 2022. – Vol. 12. – № 11. – P. 1801. – DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12111801>.
13. Boelt, B. Multispectral imaging – a new tool in seed quality assessment? / B. Boelt, S. Shrestha, Z. Salimi et al. // *Seed Science Research*. – 2018. – Vol. 28. – № 3. – P. 222-228. – DOI: <https://doi.org/10.1017/S0960258518000235>.
14. Castro, É.B. de L. Classification of *Phaseolus lunatus* L. using image analysis and machine learning models / É.B. de L. Castro, R. de S. Melo, E.M. da Costa et al. // *Revista Caatinga*. – 2022. – Vol. 35. – № 4. – P. 772-782. – DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-21252022v35n404rc>.
15. Cuzzuol, G.R.F. Relationship between N, P, and K and the quality and stem structural characteristics of *Caesalpinia echinata* Lam. plants / G.R.F. Cuzzuol, C.R.D. Milanez, J.M.L. Gomes et al. // *Trees*. – 2013. – Vol. 27. – № 5. – P. 1477-1484. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-013-0894-9>.
16. Dell’Aquila, A. Digital Imaging Information Technology Applied to Seed Germination Testing: A Review / A. Dell’Aquila // *Sustainable Agriculture* / E. Lichtfouse et al. eds. . – Dordrecht : Springer Netherlands, 2009. – P. 377-388.
17. Dornyak, O. Immersion Freezing of a Scots Pine Single Seed in a Water-Saturated Dispersion Medium: Mathematical Modelling / O. Dornyak, A. Novikov // *Inventions*. – 2020. – Vol. 5. – № 4. – P. 51. – DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions5040051>.
18. Downie, B. Upgrading germinability and vigour of jack pine, lodgepole pine, and white spruce by the IDS technique / B. Downie, B.S.P. Wang // *Canadian Journal of Forest Research*. – 1992. – Vol. 22. – № 8. – P. 1124-1131. – DOI: <https://doi.org/10.1139/x92-149>.
19. Drapalyuk, M. 140th anniversary of the birthday of Alexander Vladimirovich Tyurin / M. Drapalyuk, A. Sivolapov, V. Bugakov, M. Razinkov // *Forestry Engineering Journal*. – 2023. – Vol. 12. – № 4. – P. 5-13. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/1>.

20. ElMasry, G. Recent Applications of Multispectral Imaging in Seed Phenotyping and Quality Monitoring—An Overview / G. ElMasry, N. Mandour, S. Al-Rejaie et al. // *Sensors*. – 2019. – Vol. 19. – № 5. – P. 1090. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s19051090>.
21. Esteve Agelet, L. Limitations and current applications of Near Infrared Spectroscopy for single seed analysis / L. Esteve Agelet, C.R. Hurburgh // *Talanta*. – 2014. – Vol. 121. – P. 288-299. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2013.12.038>.
22. Gallardo-Salazar, J.L. Seedling quality and survival of a true fir [*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham.] forest plantation from two provenances in central Mexico / J.L. Gallardo-Salazar, D.A. Rodríguez-Trejo, S. Castro-Zavala // *Agrociencia*. – 2019. – Vol. 53. – № 4. – P. 631-643.
23. Grossnickle, S. Seedling Quality: History, Application, and Plant Attributes / S. Grossnickle, J. MacDonald // *Forests*. – 2018. – Vol. 9. – № 5. – P. 283. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f9050283>.
24. Himanen, K. Seed quality attributes in seedling production of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) / K. Himanen // *Dissertationes Forestales*. – 2018. – Vol. 261. – P. 74. – DOI: <https://doi.org/10.14214/df.261>.
25. Hornberg, A. Handbook of machine vision / A. Hornberg. – Ladenburg : John Wiley & Sons, 2007. – 798 p.
26. Hu, J. Rapid evaluation of the quality of chestnuts using near-infrared reflectance spectroscopy / J. Hu, X. Ma, L. Liu et al. // *Food Chemistry*. – 2017. – Vol. 231. – P. 141-147. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.03.127>.
27. Ivetić, V. The role of forest reproductive material quality in forest restoration / V. Ivetić, A.I. Novikov // *Forestry Engineering Journal*. – 2019. – Vol. 9. – № 2. – P. 56-65. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.2/7>.
28. Kang, K.-S. Seed orchards (Establishment, Management and Genetics) / K.-S. Kang, N. Bilir. – Ankara, Turkey : OGEM-VAK Press, 2021. – 1-189 p.
29. Keefe, R.F. Marked, biased, filter (MBF): use of digital X-radiography and mark-recapture to partition seed lots based on sampled individual seed quality attributes / R.F. Keefe, A.S. Davis // *New Forests*. – 2012. – Vol. 43. – № 2. – P. 169-184. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-011-9271-y>.
30. Khouja, M. Lipid Profile Quantification and Species Discrimination of Pine Seeds through NIR Spectroscopy: A Feasibility Study / M. Khouja, R.N.M.J. Páscoa, D. Melo et al. // *Foods*. – 2022. – Vol. 11. – № 23. – P. 3939. – DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11233939>.
31. Lamichhane, J.R. Abiotic and biotic factors affecting crop seed germination and seedling emergence: a conceptual framework / J.R. Lamichhane, P. Debaeke, C. Steinberg et al. // *Plant and Soil*. – 2018. – Vol. 432. – № 1-2. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3780-9>.
32. Lestander, T.A. NIR spectral information used to predict water content of pine seeds from multivariate calibration / T.A. Lestander, P. Geladi // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2005. – Vol. 35. – № 5. – P. 1139-1148. – DOI: <https://doi.org/10.1139/x05-046>.
33. Lestander, T.A. NIR spectroscopic measurement of moisture content in Scots pine seeds / T.A. Lestander, P. Geladi // *The Analyst*. – 2003. – Vol. 128. – № 4. – P. 389. – DOI: <https://doi.org/10.1039/b300234a>.
34. Li, H. Near-Infrared Spectroscopy Coupled Chemometric Algorithms for Rapid Origin Identification and Lipid Content Detection of *Pinus Koraiensis* Seeds / H. Li, D. Jiang, J. Cao, D. Zhang // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20. – № 17. – P. 4905. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s20174905>.
35. Mataruga, M. Monitoring and control of forest seedling quality in Europe / M. Mataruga, B. Cvjetković, B. De Cuyper et al. // *Forest Ecology and Management*. – 2023. – Vol. 546. – № August. – P. 121308. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121308>.
36. Mohan, M. UAV-supported forest regeneration: Current trends, challenges and implications / M. Mohan, G. Richardson, G. Gopan et al. // *Remote Sensing*. – 2021. – Vol. 13. – № 13. – DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13132596>.
37. Frontier technique of creating protective forests stands around nurseries on inefficient sites: technological foundations / V. Ivetić et al. // *Forestry Engineering Journal*. – 2022. – Vol. 12. – № 2. – P. 115-125. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/10>.

38. Detection of Scots pine single seed in optoelectronic system of mobile grader: mathematical modeling / M. Tigabu et al. // *Forests*. – 2021. – Vol. 12. – № 2. – P. 240. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f12020240>.
39. Novikov, A.I. About new means of forest seeds sorting in coniferous breeds [in Russian - O novykh sposobakh sortirovaniya lesnykh semyan khvoynykh porod] // *Forests of Eurasia in the third millennium: Proceedings of the international conference of young scientists*. – Moscow, Russian Federation, 2001. – P. 90-91. <https://elibrary.ru/rxiqj>.
40. Novikov, A.I. Improvement of technology for obtaining high-quality forest seed material : advanced Doctoral Thesis. – Voronezh State University of Forestry and Technologies, 2021. – 341 p. <https://elibrary.ru/jxtbsb>.
41. Novikov, A.I. Some technological features of the sorting devices and development trends // *Forest and youth VSAFE - 2000: proceedings of the anniversary scientific conference of young scientists dedicated to 70-th anniversary of VSAFE*. – Voronezh, Russian Federation, 2000. – P. 53-60. <https://elibrary.ru/snisit>.
42. Novikov, A.I. Visible wave spectrometric features of Scots pine seeds: the basis for designing a rapid analyzer / A.I. Novikov // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 226. – № 1. – P. 012064. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012064>.
43. Mechanization of coniferous seeds grading in Russia: a selected literature analysis / B.T. Ersson et al. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2020. – Vol. 595. – P. 012060. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/595/1/012060>.
44. The effect of seed coat color grading on height of one-year-old container-grown Scots pine seedlings planted on post-fire site / V. Ivetić et al. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 226. – P. 012043. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012043>.
45. Scots pine seedlings growth dynamics data reveals properties for the future proof of seed coat color grading conjecture / V. Ivetić et al. // *Data*. – 2019. – Vol. 4. – № 3. – P. 106. – DOI: <https://doi.org/10.3390/data4030106>.
46. Dickson Quality Index: relation to technological impact on forest seeds / S. Rabko et al. // *Forestry Engineering Journal*. – 2023. – Vol. 13. – № 1. – P. 23-36. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/2>.
47. Performance of Scots pine seedlings from seeds graded by colour / M.V. Drapalyuk et al. // *Forests*. – 2019. – Vol. 10. – № 12. – P. 1064. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f10121064>.
48. Aerial seeding of forests in Russia: A selected literature analysis / B.T. Ersson et al. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 226. – № 1. – P. 012051. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012051>.
49. Novikova, T.P. Economic evaluation of mathematical methods application in the management systems of electronic component base development for forest machines / T.P. Novikova, A.I. Novikov // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 392. – № 1. – P. 012035. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/392/1/012035>.
50. Reforestation pipeline: case for quality management of NIR-region grading of Scots pine seeds and FLR-algorithm for information processing / E.P. Petrishchev et al. // *Silva Balcanica*. – 2023. – Vol. 24. – № 3. – DOI: <https://doi.org/10.3897/silvabalcanica.24.e114699>.
51. The Root Collar Diameter Growth Reveals a Strong Relationship with the Height Growth of Juvenile Scots Pine Trees from Seeds Differentiated by Spectrometric Feature / C.B. Mastrangelo et al. // *Forests*. – 2023. – Vol. 14. – № 6. – P. 1164. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f14061164>.
52. Ozbey, A. Block effect on genetic parameters in a 23-year-old progeny trial of *Pinus brutia* / A. Ozbey, N. Bilir // *Forestry Engineering Journal*. – 2022. – Vol. 12. – № 2. – P. 5-13. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/1>.
53. Royer-Tardif, S. Revisiting the Functional Zoning Concept under Climate Change to Expand the Portfolio of Adaptation Options / S. Royer-Tardif, J. Bauhus, F. Doyon et al. // *Forests*. – 2021. – Vol. 12. – № 3. – P. 273. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f12030273>.

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

Приложение А. Фрагменты исходных данных для построения диаграммы иерархической кластеризации

Таблица А1

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

Table A1

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

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

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

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

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

Источник: систематический поиск автора Новиковой Т.П.

Source: systematic search for authors Novikova T.P.

Таблица A2

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

Table A2

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

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

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

Сведения об авторах

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

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

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

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, Chair of Wood Science, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1230-0433>, e-mail: arthur.novikov@vglta.vrn.ru.

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

✉ – Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/2>

УДК 630 : 620.178.1



Исследование структуры и механических свойств годовых колец древесины дуба черешчатого (*Quercus robur*) методами наноиндентирования и скретч-теста

Александр И. Тюрин ✉, tyurinalexander@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8020-2507>

Александр А. Самодуров, samsasha@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9600-8140>

Дмитрий Ю. Головин, tarlin@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0007-5130-2665>

Мария А. Юнак, mascha150383@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-5902-7626>

Виктор В. Коренков, ya.vikkor@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0009-4884-6850>

Петр А. Баранчиков, nano@tsutmb.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0565-3724>

Владимир А. Тюрин, nano@tsutmb.ru, <https://orcid.org/0009-0004-3439-6709>

Наталья М. Куркина, nano@tsutmb.ru, <https://orcid.org/0009-0004-0698-2567>

ФГБОУ ВО «Тамбовский Государственный Университет имени Г.Р. Державина», ул. Интернациональная, 33, г. Тамбов, 392000, Российская Федерация

Для изучения строения древесины, ее кольцевой структуры обычно используют оптические методы и оптические свойства. Однако эти свойства напрямую не связаны с ее механическими и другими физическими характеристиками. Для их исследования применяют не сильно распространенные в древесиноведении методы рентгеновской денситометрии, синхротронного излучения, ядерного магнитного резонанса и др. Эти методы достаточно трудоемки и требуют дорогостоящего оборудования. В связи с этим возникает необходимость разработки простых и удобных средств и методик исследования микромеханических свойств древесины. Основной целью работы является разработка такого подхода с применением наноиндентирования (НИ) и цифрового царапания поперечного среза древесины и выявление его потенциала в дальнейшем развитии дендрохронологии и смежных дисциплин. Методом НИ получены радиальные зависимости твердости H и модуля Юнга E для одиннадцати последовательных годовых колец древесины дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) для 3-х различных нагрузок $P_{\max} = 2, 100$ и 500 мН. Определены значения H в диапазоне от 70 до 340 МПа и модуля Юнга E в диапазоне от 2 до 10 ГПа для соответствующих нагрузок и зон ранней (EW) и поздней древесины (LW). Методом скретч-теста получены профили нормальной силы F_n и соответствующие твердости H_s (в диапазоне от 53 до 225 МПа) за период 2007-2020 гг. По данным обоих методов определены ширины годовых колец, расхождение значений с оптическим методом составило $< 3\%$.

Ключевые слова: наноиндентирование, скретч-тест, годовые кольца, структура и механические свойства древесины, *Quercus robur* L., твердость, модуль Юнга

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-16-00231, <https://rscf.ru/project/23-16-00231/>.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов (за вклад в экспертную оценку статьи) и центр коллективного пользования научным оборудованием ТГУ имени Г.Р. Державина (за предоставление оборудования, с использованием которого получены экспериментальные результаты).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.


Для цитирования: Исследование структуры и механических свойств годичных колец древесины дуба черешчатого (*Quercus robur*) методами наноиндентирования и скретч-теста / А. И. Тюрин, А. А. Самодуров, Д. Ю. Головин, М. А. Юнак, В. В. Коренков, П. А. Баранчиков, В. А. Тюрин, Н. М. Куркина // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 4 (52). – Ч. 1. – С. 40–57. – Библиогр.: с. 53–56 (25 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/2>.


Поступила 24.11.2023. *Пересмотрена* 29.11.2023. *Принята* 30.11.2023. *Опубликована онлайн* 29.12.2023.

Article


Study of the structure and mechanical properties of annual rings of pedunculate oak (*Quercus robur*) using nanoindentation and scratch test methods

Alexander I. Tyurin✉, tyurinalexander@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-8020-2507>

Alexander A. Samodurov, samsasha@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0002-9600-8140>

Dmitrii Yu. Golovin, tarlin@yandex.ru,  <https://orcid.org/0009-0007-5130-2665>

Mariya A. Yunak, mascha150383@mail.ru,  <https://orcid.org/0009-0008-5902-7626>

Viktor V. Korenkov, ya.vikkor@yandex.ru,  <https://orcid.org/0009-0009-4884-6850>

Petr A. Baranchikov, nano@tsutmb.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-0565-3724>

Vladimir A. Tyurin, nano@tsutmb.ru,  <https://orcid.org/0009-0004-3439-6709>

Natalia M. Kurkina, nano@tsutmb.ru,  <https://orcid.org/0009-0004-0698-2567>

G.R. Derzhavin Tambov State University, Internationalnaya srt., 33, Tambov, 392000, Russian Federation

Abstract

Optical methods and optical properties are usually used to research the structure of wood and its ring structure. However, these properties are not directly related to its mechanical and other physical characteristics. To study them, methods of x-ray densitometry, synchrotron radiation, nuclear magnetic resonance, etc., which are not very common in wood science, are used. These methods are quite labor-intensive and require expensive equipment. In this regard, there is a need to develop simple and convenient means and methods for studying the micromechanical properties of wood. The main goal of the work is to develop such an approach using nanoindentation and digital scratching of a cross section of wood and to identify its potential in the further development of dendrochronology and related disciplines. Using the NI method, radial dependences of hardness H and Young's modulus E were obtained for eleven consecutive annual pedunculate oak (*Quercus robur* L.) wood rings for 3 different loads $P_{\max} = 2, 100$ and 500 mN. The values of H in the range from 70 to 340 MPa and Young's modulus E in the range from 2 to 10 GPa were determined for the corresponding loads and early (EW) and late wood (LW). Using the scratch test method, profiles of the normal force F_n and the corresponding hardness H_s (in the range from 53 to 225 MPa) were obtained for the period 2007-2020. According to both methods, the widths of annual rings were determined; the discrepancy between the values and the optical method was $< 3\%$.

Keywords: nanoindentation, scratch test, annual rings, structure and mechanical properties of wood, *Quercus robur* L., hardness, Young's modulus

Funding: this study has been supported by the grant the Russian Science Foundation, RSF № 23-16-00231, <https://rscf.ru/project/23-16-00231/>.

Acknowledgments: The authors thank the reviewers (for their contribution to the peer review of the article) and the center for collective use of scientific equipment of TSU named after G.R. Derzhavin (for providing equipment using which experimental results were obtained).

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

For citation: Tyurin A. I., Samodurov A. A., Golovin D. Yu., Yunak M. A., Korenkov V. V., Baranchikov P. A., Tyurin V. A., Kurkina N. M. (2023). Study of the structure and mechanical properties of annual rings of pedunculate oak (*Quercus robur*) using nanoindentation and scratch test methods. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 4 (52), part 1, pp. 40-57 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/2>.

Received 24.11.2023. **Revised** 29.11.2023. **Accepted** 30.11.2023. **Published online** 29.12.2023

Введение

Натуральная древесина, ее механические свойства, особенности микроструктуры, их взаимосвязь представляют большой интерес, как для инженерных, так и не инженерных областей науки. В частности, на базе знаний о структуре годовых колец роста (GR) развивается дендрохронология (датировка старинных построек, судов, произведений искусства, музыкальных инструментов, предметов быта и т.д.) [1-3], дендроклиматология (параметры годовых колец древесины служат одними из наиболее достоверных источников информации о климате и условиях окружающей среды в прошлом) [4-5], дендрозоология [6], дендрoarхеология [7], дендргеоморфология и другие дисциплины [8,9].

Однако на базе существующих в дендрохронологии и дендроклиматологии математико-статистических подходов информация, содержащаяся в характеристиках годичного кольца деревьев, не может быть извлечена полностью.

Оптические методы (ОМ), обычно дополненные программами анализа оцифрованных изображений поперечного среза древесины [1,2,6,7,9], получили наибольшее распространение в анализе GR. Получение первичной информации в ОМ основано на различии отражательных свойств ранней и поздней древесины (EW и LW соответственно). Чередующиеся GR на поперечных срезах/кернах представляют собой своеобразный архив событий, отражающихся на морфологии и скорости прироста древесины в течение вегетационного периода. Данные о параметрах годичных колец несут достаточно полную информацию о климате и условиях роста, и косвенно – о качестве и свойствах древесины. Вариации ширины годового кольца W служат основным источником данных в задачах дендрохронологии. Однако,

эта древесная летопись написана на слабо исследованном языке, который нуждается в расшифровке и интерпретации. Неполнота и косвенный характер информации, получаемый ОМ, сильно затрудняют эту задачу.

Анализ изображения колец в синем диапазоне с начала XXI века считается более информативным и надежным, чем в других участках спектра. Эту разновидность ОМ обычно называют методом Blue Intensity (BI) и широко используют в настоящее время в дендрохронологии [10-12]. Следует отметить, что для принятия решений о проведении границ между отдельными GR, слоями EW и LW, а также выявления и отсеивания ложных колец практически все ОМ требуют в той или иной степени участия высококвалифицированного оператора, что вносит в результаты анализа элемент субъективности. В [13] приводится сравнительный анализ подобных методов проведения демаркационных линий между EW и LW в Norway spruce.

Реже используют рентгено-денситометрические методы [14,15], которые дают информацию о локальной плотности древесины, несколько более понятным образом коррелирующей с прочностью, чем данные, полученные с помощью ОМ. Еще более редки случаи применения для исследования структуры древесины экзотических для древоведения методов – синхротронного излучения [16], ядерного магнитного резонанса [17] и др. [18,19].

Констатируем, что ширина годовых колец роста, внутрикольцевые вариации их свойств, клеточная микроструктура несут отпечаток климатических, экологических, геоморфологических изменений в условиях роста, удаленных от нас на сотни, а иногда и на тысячи лет. Эти своеобразные архивы нуждаются в расшифровке и извлечении максимума информации, которая может в них содержаться. Как

уже было сказано выше, обычно в качестве источника первичной информации используют оптические свойства тщательно подготовленной поверхности торцевого среза дерева. Общим недостатком всех ОМ является то, что оптические свойства различных элементов структуры древесины хоть и отличаются друг от друга, но не связаны прямо с механическими и другими ее физическими свойствами.

Из этого вытекает потребность в разработке простых удобных подходов и методов изучения микромеханических свойств древесины, имеющих более высокую информативность, лучшее разрешение и производительность, меньшую трудоемкость и стоимость оборудования.

Основной целью работы была разработка объективного и не зависящего от опыта оператора метода непрерывного определения микромеханических свойств GR путем локального цифрового скретчинга и динамического наноиндентирования торцевого среза древесины и выявления его потенциала в создании основ дендрохронологии нового поколения.

Материалы и методы

Работа является теоретико-эмпирическим исследованием.

Предмет и объект исследования

Эксперимент был проведен на образцах дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) возрастом 90-110 лет Учебно-опытного лесхоза Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г. Ф. Морозова (Правобережное участковое лесничество). Сбор образцов осуществляли в сентябре 2021 года.

Предмет исследования – поперечный срез древесины дуба черешчатого (*Quercus robur* L.).

Для проведения исследований из поперечного среза древесины вырезали образцы в виде параллелепипедов размером 10×30×250 mm и подвергали сушке при температуре 70°C до влажности 8%. Используемый режим обеспечивает бездефектную сушку древесины и не влияет на ее природные физико-механические свойства. Влажность образцов во время и после сушки контролировали методом взвешивания на аналитических весах. Длинная сто-

рона образцов совпадала с радиальным направлением в стволе дерева. Все исследования структуры и свойств GR проводили на поперечном срезе древесины. Подготовку поверхности для разных видов исследования осуществляли по-разному. Сначала ее обрабатывали абразивами с последовательно уменьшающимся размером зерна на шлифовально-полировальной машине до выявления четкой клеточной структуры. Такая подготовка была достаточна для проведения скретч-теста. Для исследования клеточной структуры и годовых колец древесины методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и наноиндентирования (НИ) с поверхности образца при помощи санного микротомы Slide 4004M PFM (Pfmmedical, Германия) дополнительно срезают слой толщиной в несколько десятков микрометров.

Применение методов СЭМ осуществляли на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 3, Thermo Fisher Scientific, USA (табл. 1). Типичные СЭМ-изображения древесины дуба (*Q. robur* L.) представлены на рис. 1.

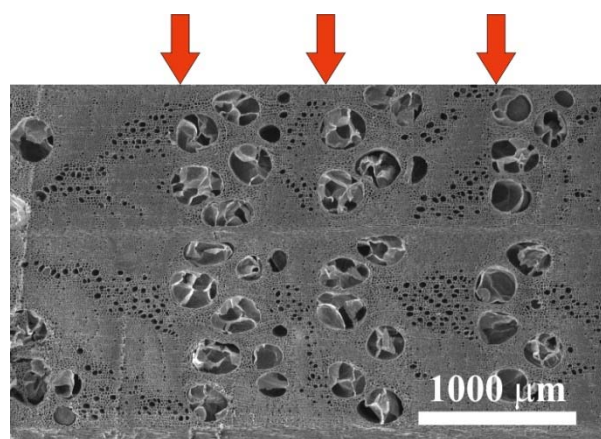
Таблица 1
Основные технические характеристики сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega 3 (Thermo Fisher Scientific, США)

Table 1
Specifications SEM Tescan Vega 3 (Thermo Fisher Scientific, USA)

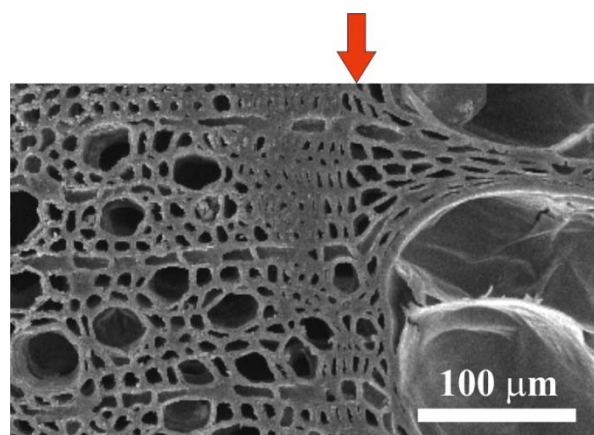
Параметр Option	Значение value
Получение растрового изображения Raster image magnification	увеличение от 3× до 1 000 000× from 3× to 1 000 000×
Электронная пушка Electron gun	Вольфрамовый катод с термоэлектронной эмиссией Tungsten cathode with thermionic emission
Рабочий вакуум, Па Vacuum, Pa	< 9×10 ⁻³
Поле зрения Field of view	7,7 мм при аналитическом рабочем расстоянии 10 мм, 24

Параметр Option	Значение value
	мм при рабочем расстоянии 30 мм 7.7 mm at analytical distance 10 mm, 24 mm at distance 30 mm
Ускоряющее напряжение Voltage	от 200 В до 30 кВ from 200 V to 30 kV
Энергетическое разрешение, эВ Energy resolution, eV	< 129 (Mn Ka)
Площадь детектора мм ² Detector area, mm ²	30
Возможность обнаружения элементов Search for elements	от В (5) до Cf (98) from B (5) to Cf (98)
Максимальная скорость счета на входе Maximum input count rate	> 1000000 имп/с > 1,000,000 pulses/s
Производитель Produced by	Thermo Fisher Scientific, США Thermo Fisher Scientific, USA

Источник: Thermo Fisher Scientific, USA
Source: Thermo Fisher Scientific, USA



(a)



(b)

Рисунок 2. СЭМ-изображение клеточной структуры годовых колец дуба (*Q. robur* L.), при различном увеличении (a) и (b). Стрелочками указаны положения границ годовых колец

Figure 2. SEM image of the cellular structure of oak (*Q. robur* L.) annual rings, at different magnifications (a) and (b). The arrows indicate the positions of the boundaries of the annual rings

Источник: собственное СЭМ-изображение авторов
Source: own SEM image

Теоретические предпосылки

Внутрикольцевые свойства древесины исследовали методами непрерывного НИ и модифицированного для этих целей скретч-теста. Эти методы позволяют исследовать механические свойства в широких пределах прикладываемых нагрузок и областей деформирования, реализуя мультимасштабный подход.

Под методами непрерывного НИ [20] понимают совокупность методов локальных наномеханических испытаний, заключающихся во внедрении в поверхность образца зонда (индентора) специальной формы с одновременной регистрацией величины приложенной силы P и глубины h погружения индентора [20-23]. Из полученных диаграмм нагружения построенных в координатах $P-h$ по методике Оливера-Фарра принятой за основу в стандартах ISO 14577 и ГОСТ Р 8.748–2011 извлекают величины модуля Юнга E и твердости H [20].

Для измерения наномеханических свойств древесины методами НИ в работе применяли прецизионный комплекс Nanotester Triboindenter TI-950, Hysitron, USA (табл. 2). В качестве применяемого

зонда был использован трехгранный алмазный индентор Берковича с радиусом кривизны в вершине около 30 нм.

Таблица 2
Основные технические характеристики комплекса
Nanotester Triboindenter TI-950 (Hysitron, США)
Table 2
Specifications Nanotester Triboindenter TI-950
(Hysitron, USA)

Параметр Option	Значение value
Разрешение нормальной нагрузки, нН Normal Load Resolution, nN	3
Максимальная нормальная нагрузка, мН Maximum normal load, mN	10
Минимальная контактная нагрузка, нН Minimum contact load, nN	70
Максимальная скорость нагружения, мН/с Maximum loading speed, mN/s	50
Разрешение нормального смещения, нм Normal offset resolution, nm	0.02
Точность позиционирования индентора, нм Indenter positioning accuracy, nm	± 10
Производитель Produced by	Hysitron, USA Hysitron, США

Источник: Hysitron, США

Source: Hysitron, USA

Суть метода «скретч-теста» заключалась в царапании образца древесины зондом вдоль радиальной оси с одновременной регистрацией нормальной и латеральной компонент силы, действующей на зонд. Величина приложенной силы определяется физико-механическими свойствами древесины и геометрией кончика применяемого зонда (индентора). Дальнейшая обработка получаемых первичных данных позволяла количественно и непрерывно с микрометровым разрешением получать локальные данные о физико-механических свойствах исследуемого материала.

Дизайн эксперимента

Для реализации скретч-теста использовали оригинальный прибор собственной разработки, содержащий 2-х координатную систему с неподвижной базовой платформой и подвижной кареткой, установленной на горизонтальных направляющих. Эта каретка со сменным датчиком силы и закрепленным на нем зондом перемещалась параллельно поверхности образца с постоянной заданной скоростью V от 30 мкм/с до 8 мм/с. Управление перемещением осуществляли шаговым двигателем через контроллер, подключенный к компьютеру. Глубина d погружения зонда в материал задавалась вертикальным приводом, расположенным на каретке. В качестве зонда в данной работе использовали стандартный индентор Роквелла из закаленной стали, имевший коническую форму с углом 120 градусов и радиусом закругления в вершине $R = 200$ мкм. Для измерения нормальной и латеральной компонент силы взаимодействия зонда с образцом использовали двухкоординатный датчик силы LF-202M (Ligent Sensor Tech Co., Ltd., Китай). Датчик имел предел измерения 150 Н, а разрешение системы составляло 10 мН по каждой оси. Оцифровывали поток данных 24 разрядным АЦП с частотой 30 Гц и загружали в память компьютера.

Варьирование величин V и d позволяло менять скорость относительной деформации $\dot{\epsilon} \sim V/d$ при механических испытаниях в очень широких пределах – от 0.3 до 1000 с⁻¹. Большие скорости деформации (>10 с⁻¹) полностью исключают влияние ползучести и вязкоупругости на результаты тестирования.

Механическое тестирование в данной схеме проводили в режиме «жесткой» испытательной машины. Это означает, что испытание происходит при заданной фиксированной глубине погружения зонда d в испытуемый материал. Величина d соответствует абсолютной деформации поверхности материала независимо от его упругости, вязкоупругости, ползучести, пластичности и т.д., а датчик силы фиксирует сопротивление этой деформации.

В качестве реперного метода для измерения ширины годовых колец в работе использовали оптический метод, заключающийся в обработке изобра-

жений поверхности образцов с разрешением не менее 900 точек на дюйм, то есть не хуже 30 мкм. Относительная погрешность определения ширины колец после усреднения результатов 4-х измерений не превышала 1%. Такая методика измерения близка к стандартной и широко применяемой в древесиноведении и дендрохронологии оптической методике, описанной выше.

На первом этапе работы методами NI были измерены радиальные распределения значений нано- и микротвердости H и модуля Юнга E в годовых кольцах древесины дуба черешчатого (*Q. robur* L.) при трех значениях максимальной нагрузки P_{\max} , приложенной к индентору ($P_{\max} = 2$ мН, $P_{\max} = 100$ мН и $P_{\max} = 500$ мН).

На втором этапе для исследования кольцевой структуры древесины дуба черешчатого (*Q. robur* L.) методом скретч-теста были получены профили нормальной силы F_n . В этой серии экспериментов варьировали глубину царапины d в диапазоне от 10 до 300 мкм. Далее был проведен анализ геометрического профиля царапины, полученной при скретч-тесте древесины дуба черешчатого (*Q. robur* L.).

Анализ данных

При построении радиальных зависимостей твердости и модуля Юнга, полученных методом NI, каждая точка на графиках усреднялась по 5–10 независимым тестам, проведенным при одних и тех же параметрах эксперимента.

Управление скретч-тестером, получение, хранение и обработку полученных данных осуществляли с помощью ПО собственной разработки.

Результаты

Полученные на первом этапе методом NI результаты показаны на рис. 2.

Типичные значения поперечного размера (стороны) отпечатка a при $P_{\max} = 2$ мН составляли 3–10 мН, что в сопоставимо с поперечным размером стенки клетки. При увеличении P_{\max} до значений

$P_{\max} = 100$ мН и $P_{\max} = 500$ мН поперечный размер (сторона) отпечатка a возрастает до значений 20–60 и 70–130 мкм - соответственно, что в несколько раз превышает размер клетки древесины. Вследствие этого значения твердости H и модуля Юнга E , получаемые при этих P_{\max} , являются эффективными (H_{eff} и E_{eff}), т.к. относятся к свойствам высокопористой ячеистой клеточной структуры древесины, а не отдельных клеточных стенок, имеющих в несколько раз более высокие механические свойства и плотность.

Как видно из рис. 2, эффективные значения H_{eff} и E_{eff} обладают четко выраженной периодичностью, которая хорошо согласована с положением годовых колец и их границ, выявляемых оптически по изменению отражательной способности древесины или по СЭМ изображениям. На границе соседних годовых колец древесины (при переходе от LW одного годового кольца к EW следующего годового кольца) H_{eff} и E_{eff} претерпевали скачкообразное изменение в сторону уменьшения значений H_{eff} и E_{eff} , а внутри годовых колец (при переходе от EW к LW) H_{eff} и E_{eff} – в сторону увеличения.

При этом внутри каждого слоя EW числовые значения H_{eff} и E_{eff} для исследованных последовательно расположенных годовых колец 2004–2014 годов оставались практически неизменными с отклонением не более 10–20 %, несмотря на резкие отличия в условиях роста, вызванные резкими отличиями погодных условий. Так, например, период 2004–2009 годов был достаточно благоприятным по погодным условиям роста, а 2010 год - очень засушливым, что отразилось на существенном уменьшении ширины годового кольца W – например, более, чем в два раза по сравнению с 2007 и 2008 годами. Однако это не оказало существенного влияния на определяемые механические свойства в EW (величины H_{eff} и E_{eff} остались практически постоянными).

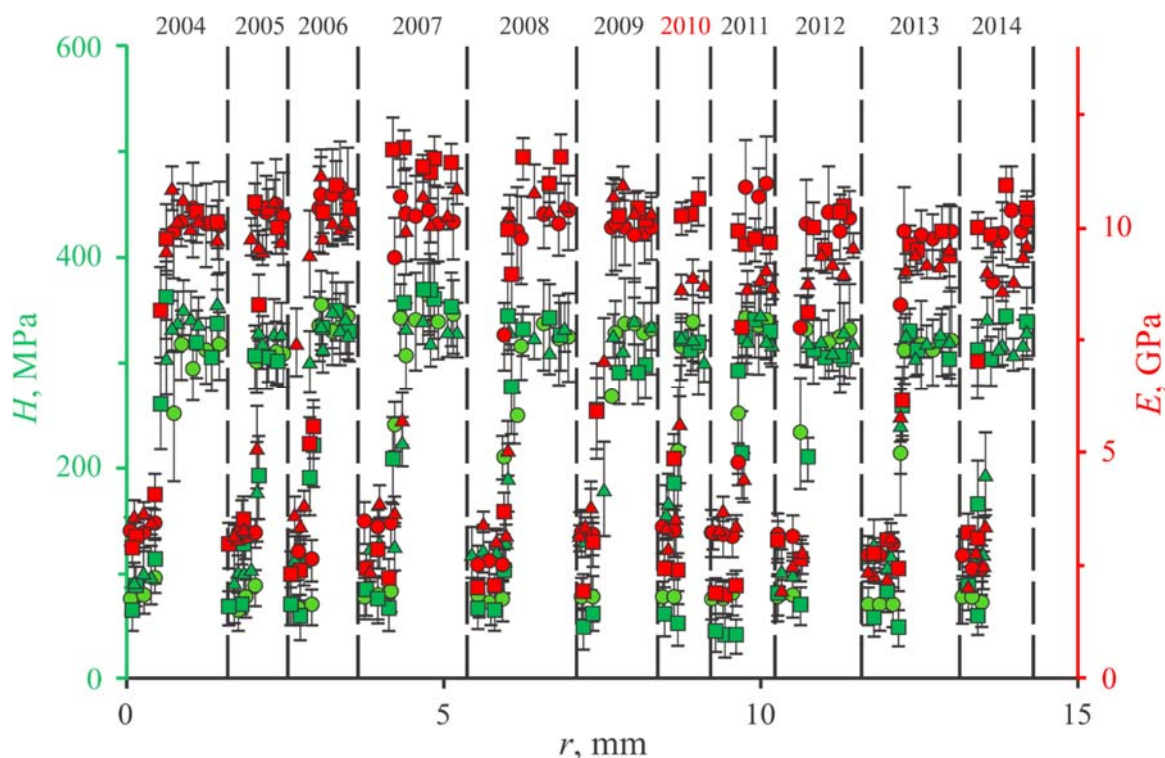


Рисунок 2. Радиальные зависимости твердости - H и модуля Юнга - E для одиннадцати последовательных годовых колец дуба (*Q. robur* L.) для 3-х различных нагрузок P_{\max} ($P_{\max} = 2$ мН – треугольники, $P_{\max} = 100$ мН – квадраты, $P_{\max} = 500$ мН – кружки). r - расстояние поперек годовых колец. Числами сверху показан год роста древесины (экстремально засушливый 2010 год выделен красным цветом). Границы годовых колец показаны штриховыми линиями.

Figure 2. Radial dependences of hardness - H and Young's modulus - E for eleven consecutive annual oak (*Q. robur* L.) rings for 3 different loads P_{\max} ($P_{\max} = 2$ mN - triangles, $P_{\max} = 100$ mN - squares, $P_{\max} = 500$ mN - circles). r is the distance across the annual rings. The numbers above show the year of wood growth (the extremely dry year of 2010 is highlighted in red). The boundaries of the annual rings are shown with dashed lines.

Источник: собственные экспериментальные данные авторов

Source: authors' own experimental data

В отличие от EW в LW вариации максимальных значений H_{eff} и E_{eff} в исследованном интервале лет были больше, но при этом не превышали нескольких десятков процентов.

Корреляция резких скачков H_{eff} и E_{eff} при переходе от LW предыдущего к EW следующего кольца с границами этих годовых колец (см. рис. 2) позволила применить метод сканирующего NI для определения ширины годовых колец W_{NI} . Сравнение W_{NI} и W_{O} , определенных двумя независимыми методами (NI и оптическим), показаны на рис. 3. Из полученных данных следует, что расхождение между W_{NI} и W_{O} не превышает 2–3%. Среднее отклонение

по 11 годовым кольцам было вдвое меньше. На основании этого можно сделать вывод, что метод сканирующего NI может быть применим не только для определения локальных механических свойств, но и для определения границ и ширины годовых колец, при чем как самостоятельно (альтернативно), так и дополнительно по отношению к оптическому.

Результаты второго этапа исследования, полученные методом скретч-теста, представлены профилями нормальной силы F_n (рис. 4) и 3D изображением царапины (рис. 5) на поверхности древесины дуба черешчатого (*Q. robur* L.).

Профиль нормальной силы $F_n(x)$ на рис. 4 имеет осциллирующий характер, аналогичный профилю твердости $H(r)$, полученному при NI.

На рис. 5а показано 3D изображение царапины на поверхности древесины дуба черешчатого (*Q. robur* L.). По данным профилометрии следует, что изменение глубины в пределах шума не наблюдается при переходе из поздней в раннюю древесину следующего годового кольца. Это подтверждает, что жесткость силовой рамы разработанного прибора превышает жесткость контакта в древесине, а сама реализация скретч-теста происходит в режиме «жесткой машины» с сохранением постоянной глубины d и регистрацией профиля силы.

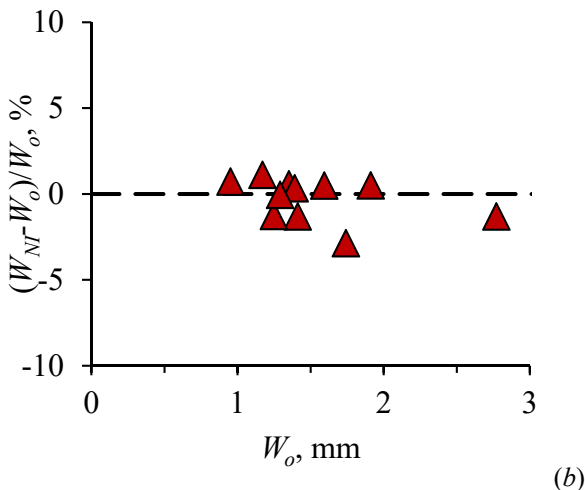
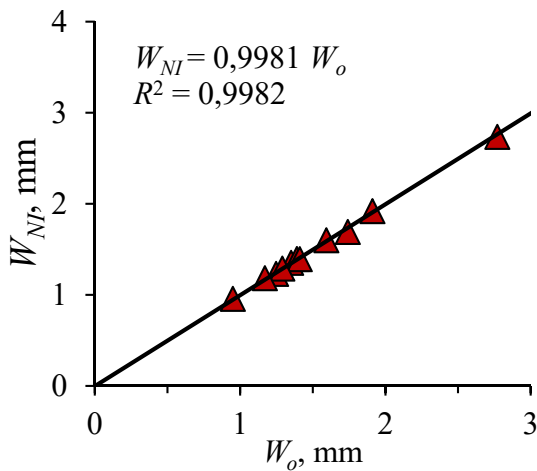


Рисунок 3. Результаты измерений ширины годовых колец древесины дуба черешчатого (*Q. robur* L.) методом наноиндентирования W_{NI} и оптическим методом W_o (a) и расхождения между этими методами (b).

Figure 3. Results of measurements of the width of oak (*Q. robur* L.) annual rings using the WNI nanoindentation method and the W_o optical method (a) and the discrepancies between these methods (b).

Источник: собственные экспериментальные данные авторов

Source: authors' own experimental data

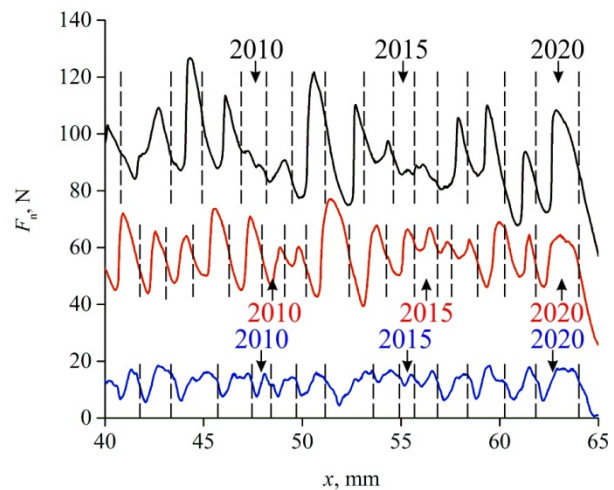


Рисунок 4. Профиль нормальной силы F_n при скретчинге древесины дуба черешчатого (*Q. robur* L.) на 3 разных глубинах царапины d : 300 мкм (черная), 100 мкм (красная), 50 мкм (синяя). Пунктиром показаны границы колец, числами – соответствующий год их роста.

Figure 4. Profile of normal force F_n when scratching oak wood at 3 different scratch depths d : 300 μm (black), 100 μm (red), 50 μm (blue). The dotted line shows the boundaries of the rings, the numbers indicate the corresponding year of their growth.

Источник: собственные экспериментальные данные авторов

Source: authors' own experimental data

Поперечный профиль царапин (рис. 5б) показывает, что после выполнения скретч-теста происходит частичное восстановление деформации, т.к. измеренная глубина царапины d^* меньше задаваемой. Степень восстановления деформации после скретч-теста можно оценить по рис. 6.

Из анализа кривых скретч-теста, сделанных на древесине дуба черешчатого (*Q. robur* L.), видно, что отношение F_{n_max}/F_{n_min} уменьшается по мере

увеличения глубины царапания (см. табл. 3). Это происходит вследствие увеличения площади контакта зонда с поверхностью и, соответственно, усреднения механических свойств по большей площади. Само же отношение F_{n_max}/F_{n_min} – есть отношение механических свойств в LW и EW при соответствующей зоне деформации.

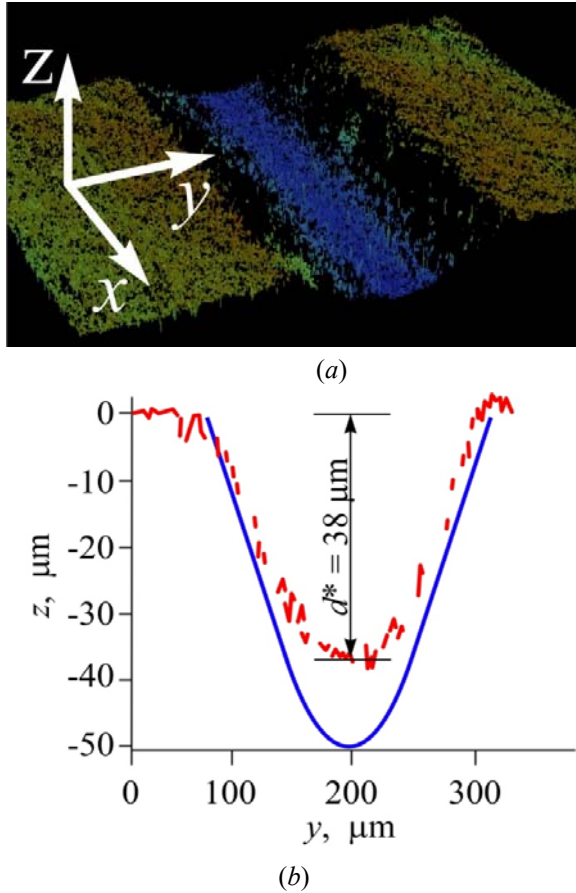


Рисунок 5. Изображение царапины (a) и соответствующие ей профили (b) на древесине дуба черешчатого (*Q. robur* L.) при $d = 50$ мкм, полученные с помощью профилометра Veeco NT 9080 (красная кривая). Синей линией отмечен профиль зонда на заданной глубине d скретч-теста.

Figure 5. Image of scratches (a) and their corresponding profiles (b) on oak with $d = 50$ μm , obtained using a Veeco NT 9080 profilometer (red curve). The blue line marks the profile of the probe at a given depth d of the scratch test.

Источник: собственные экспериментальные данные авторов

Source: authors' own experimental data

Из этого следует, что в зависимости от поставленной задачи следует выбирать форму индентора и зону деформирования, соотносить с прикладываемой P_{max} в методе NI или задаваемой глубиной d в скретч-тесте. Например, если необходимо получить макросвойства (например, макротвердость), то площадь контакта должна превышать размеры годового кольца в несколько раз.

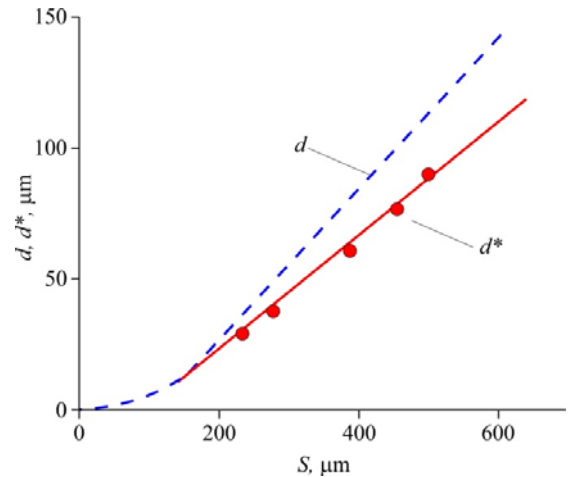


Рисунок 6. Зависимость глубины царапины d^* , полученные из данных профилометрии, (красные кружки) и глубины d , соответствующей геометрии используемого зонда (синяя пунктирная линия), от ширины S получаемой царапины.

Figure 6. Dependence of scratch depth d^* , obtained from profilometry data, (red circles) and depth d , corresponding to the geometry of the probe used (blue dotted line), on the width S of the resulting scratch.

Источник: собственные экспериментальные данные авторов

Source: authors' own experimental data

Таблица 3

Зависимости силовых параметров скретч-теста от глубины царапания

Table 3

Dependence of scratch test force parameters on scratch depth

d , мкм μm	50	100	300
d^* , мкм μm	38	77	230
F_n min, Н N	7.6 ± 1.7	48.7 ± 4.0	84.9 ± 4.5
F_n max, Н N	16.6 ± 1.0	67.3 ± 3.7	110.6 ± 8.7
F_n max/ F_n min	2.4 ± 0.6	1.40 ± 0.16	1.31 ± 0.12

Источник: собственные экспериментальные данные авторов

Source: authors' own experimental data

При решении задач исследования внутренней структуры годового кольца необходимо, чтобы область контакта была значительно меньше размеров (ширины) годового кольца, но при этом существенно больше размеров (толщины) клеточных стенок, т.е. должна быть сопоставима с размером несколько клеток. Для изменения (например, увеличения или уменьшения) пространственного разрешения можно использовать сменные зонды с другими (меньшими или большими) радиусами кривизны в вершине, например, для увеличения разрешения необходимо применять зонды с меньшими радиусами закругления и задавать меньшую величину значений d .

При этом важную роль играет и подготовка поверхности. Так, в первом случае достаточно выравнивания поверхности, например, стандартным столярным инструментом (пилой или фрезой). Во втором случае, необходима более тщательная подготовка – выровненную поверхность уже нужно шлифовать или полировать, а если важна и клеточная структура, то и подготавливать поверхность срезом.

В наших экспериментах по скретч-тесту глубине царапания $d = 100$ и 300 мкм соответствовала ширина царапины $S = 450$ и $S = 1050$ мкм соответственно. Для расчета твердости при царапании H_S конусом на такой глубине использовали формулу (1) [20] для конуса

$$H_S = \frac{F_n}{\frac{\pi S^2}{8} \sin \theta / 2}, \quad (1)$$

где θ – угол конуса индентора.

Глубине царапины $d = 30$ мкм соответствует ширина 210 мкм. Учитывая форму используемого в работе индентора, на такой глубине царапание происходит фактически сферой, а не конусом. Тогда для расчета твердости H_S из скретч-теста на такой глубине можно использовать формулу (2) для сферы [20].

$$H_S = \frac{F_n}{\frac{\pi D}{4}(D - \sqrt{D^2 - S^2})}, \quad (2)$$

где D – диаметр сферического индентора.

Границы применения формул (1) и (2) для расчета твердости при использовании нами индентора с радиусом закругления $R = 200$ мкм проходит примерно при $d = 40$ мкм

Используя данные скретч-теста и формулы для вычисления твердости, были построены ее профили на поверхности древесины дуба черешчатого (*Q. robur* L.) вдоль радиального направления. Пример профиля H_S при $d = 30$ мкм показан на рис. 7.

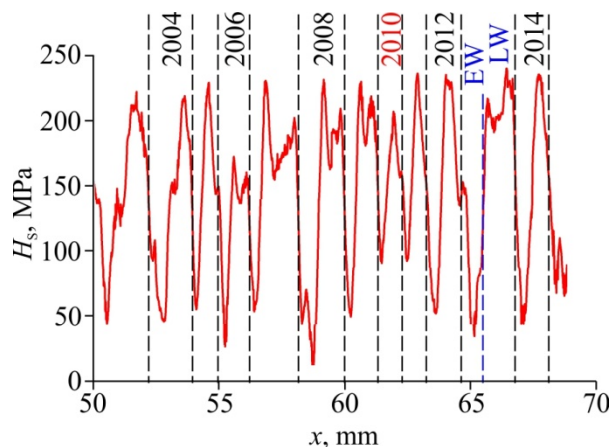


Рисунок 7. Твердость H_S дуба черешчатого (*Q. robur* L.) в радиальном направлении, полученная из данных скретч-теста 12 последовательных годовых колец на глубине царапания $d = 30$ мкм. Числами сверху показан год роста древесины.

Figure 7. Radial hardness H_S of oak (*Q. robur* L.) obtained from scratch test data of 12 consecutive growth rings at a scratch depth $d = 30$ μm. The numbers above show the year of wood growth.

Источник: собственные экспериментальные данные авторов

Source: authors' own experimental data

Из полученных профилей H_S были выделены значения твердости для зон EW и LW (приведены в табл. 4). Из табл. 2 видно, что твердость EW, полученная методами NI и скретч-теста для разных зон деформирования, начиная с 20 мкм, в пределах погрешности совпадает. Твердость LW снижается по мере увеличения зоны деформирования и стремится к значениям макротвердости.

Полученные из скретч-теста и NI профили твердостей (рис. 2 и рис. 7) имеют типичную форму и те же характерные особенности, что и профили плотности колец, получаемые с помощью рентгеновской микроденситометрии (см., например, [24]). В профилях годовых колец можно выделить зоны EW и LW, высокие значения плотности и твердости

в LW, минимальные величины в EW с сохранением их отношения.

Таблица 4

Твердость H древесины на разных масштабных уровнях, полученная методом NI и в скретч-тесте

Table 4

Hardness H of wood at different scale levels, obtained by the NI method and in the scratch test

Используемый метод Method used	a (NI), S (scratch), мкм μm	H , МПа МПа	
		EW	LW
Метод NI Method NI	3-10	110±15	340±20
	20-60	65±30	330±35
	70-130	70±15	315±30
Скретч-тест Scratch test	210	53±20	225±10
	283	62±25	203±10
	450	75±15	160±10
	1050	64±10	94±10

Источник: собственные экспериментальные данные авторов

Source: authors' own experimental data

Обсуждение

В работе [25] авторы отмечают денситометрию как один из важнейших подходов и инструментов для дендроэкологии и дендроклиматологии, который позволяет существенно расширить возможности по реконструкции различных природных процессов. При этом для такого подхода в классическом варианте отмечается и ряд существенных недостатков - громоздкость применяемого оборудования, его высокая стоимость, использование рентгеновских плёнок и т.д. [25]. Это вынуждает искать альтернативные пути развития метода денситометрии применительно к исследованию годичных колец, например, в [25] представлен альтернативный подход к измерению профиля плотности годичных колец деревьев, основанный на анализе изображения клеточной структуры колец и подсчете площадей стенок этих клеток.

Несмотря на различные подходы при анализе изображения и механическом воздействии при NI и скретч-тесте мы также действуем на стенки клеток, а откликом служит сила, действующая на зонд. Таким образом, скретч-тест может использоваться как

альтернативный способ получения профиля плотности годичных колец с последующим применением для хронологических построений.

Так как физико-механические свойства древесины в слоях LW и EW имеют существенные отличия, то по аналогии с результатами полученные методами NI из данных скретч-тестирования возможно определение ширины годичных колец W_s .

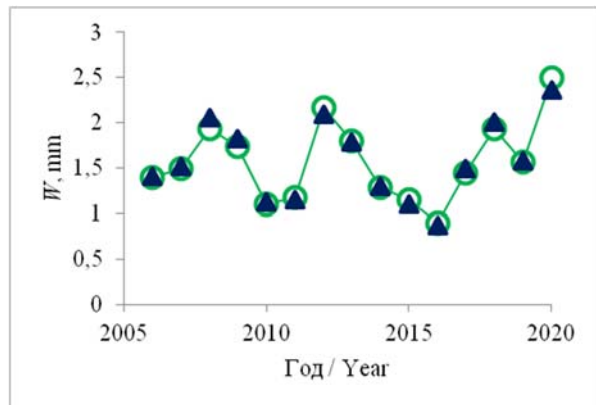
Применение метода NI требует тщательной подготовки поверхности, больших затрат времени, при этом в силу специфики метода профиль получаемых значений твердости имеет дискретный характер. В противоположность этому, профиль изменения нормальной силы F_n в процессе движения зонда при скретч-тесте перпендикулярно годовым кольцам на поперечном срезе древесины или на керне отображает ее кольцевую структуру и изменения механических свойств вдоль направления сканирования непрерывно и не требует тщательной подготовки поверхности. Такие данные позволяют использовать методику скретч-теста для определения числовых значений W и выявления доли EW и LW применительно к задачам дендрохронологии и смежных дисциплин, а также для оценки как локальных, так и интегральных механических свойств древесины и другого растительного сырья.

Определение ширины годовых колец из скретч-кривой на графиках $F_n(x)$ по разнице между соседними минимума или максимумами имеют большую неопределенность по сравнению с точкой на $1/2$ спада пика. Этот спад соответствует границе между двумя соседними кольцами. Помимо этого, независимо от глубины царапания или начальной прижимной силы (в разумных пределах), несмотря на большее усреднение свойств по площади при большей силе, точка разделения границ на оси x совпадает. Также этот критерий удобен для программирования и автоматического определения ширины колец.

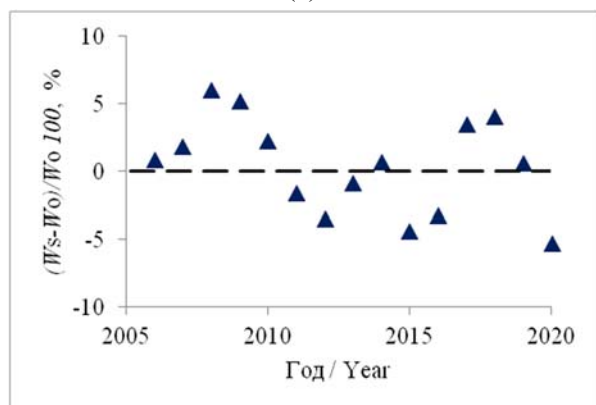
Путем проведения предварительных исследований с варьированием формы применяемого зонда и задаваемой глубины скретч-тестирования было установлено, что для решаемых в работе задач наиболее оптимальным зондом является наконечник Роквелла, для которого оптимальной с точки зрения

отношения сигнал/шум и необходимого пространственного разрешения метода для определения границ годовых колец является величина $d \approx 50$ мкм.

На рис. 8 показана ширина годовых колец W дуба черешчатого (*Q. robur* L.), определенная двумя методами - оптическим и скретч-тестом.



(a)



(b)

Рисунок 8. Корреляция ширины годовых колец W дуба черешчатого (*Q. robur* L.), полученной оптическим (кружки) и скретч методом (сплошные значки): (a) хронологические изменения W ; (b) относительное отклонение W_s от W_o .

Figure 8. Correlation of the width of annual rings W of oak (*Q. robur* L.), obtained by the optical (circles) and scratch method (solid symbols): (a) chronological changes in W ; (b) relative deviation of W_s from W_o .

Источник: собственные экспериментальные данные авторов

Source: authors' own experimental data

Сравним точность определения ширины колец в абсолютных значениях тремя методами: оптическим, скретч и индентированием. В оптическом

методе она зависит от разрешения микроскопа (оптики), оптической линейки, по которой смещается образец, и точности установление метки человеком. Так работает ЛИНТАБ. В скретч-методе и индентировании – от дискреты смещения Δx по x . В нашем экспериментальном комплексе $\Delta x = 3.1$ мкм. В индентировании она не может быть меньше стороны отпечатка. В индентировании можно уменьшить эту дискрету, проходя границу колец по диагонали.

Среднее отклонение измеренных значений ширины годовых колец, полученных оптически и при скретче, для дуба черешчатого (*Q. robur* L.) составляет 2.9 % (рис. 8b). Абсолютное среднеквадратическое отклонение такого расхождения составляло во всех случаях несколько десятков мкм, что сопоставимо с размером клетки в древесине.

Заключение

Предложен новый нано-/микромеханический подход исследования внутрикольцевой структуры древесины. Он основан на регистрации и анализе профилей изменения механических свойств древесины годовых колец в радиальном направлении. Проведена экспериментальная апробация разработанных в рамках этого подхода методов NI и скретч-теста, имеющих широкий спектр применения. Не без оснований можно полагать, что разработанные подходы будут применяться не только для древесины, но и для более широкого круга материалов, например, композитов, в особенности – имеющих сложную структуру: слоистым и волокнистым.

Разработанные методы NI и скретч-теста помимо геометрических и анатомических характеристик кольцевой структуры древесины позволяют извлекать информацию о распределениях физико-механических свойств в шкале от нано- до макро-, а затем делать построения хронологических зависимостей в задачах дендрохронологии.

Этот подход и способы получения первичного массива данных более информативны, чем используемые в традиционных оптических методиках. В то же время, относительное расхождение между значениями ширины годовых колец, полученных оптически и при скретче, для дуба черешчатого (*Q. robur* L.) составляет менее 3%.

Скретч-тест в конфигурации с используемыми в работе зондом и датчиком силы не имеет

столь высокого пространственного разрешения как NI. Но он намного более производительен, менее трудозатратен, позволяет работать в очень широком диапазоне скоростей относительной деформации материалов на больших пространственных масштабах, не требуют тщательной подготовки поверхности и дорогостоящего оборудования. Таким образом, методика скретч-теста обладает большой функциональностью и может применяться для широкого

круга задач, в том числе, дендрохронологических, дендрэкологических и других исследований. Это дает возможность его использования как альтернативы или существенного дополнения стандартным оптическим, денситометрическим и другим методам.

Список литературы

1. Frank D., Fang K., Fonti P. Dendrochronology: Fundamentals and Innovations. In Stable Isotopes in Tree Rings, Siegwolf R. T. W., Brooks J. R., Roden J., Saurer M. (eds.). Springer: Cham. 2022. 8: 21-59. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-92698-4_2.
2. Rubino D. L., Baas C. Dating Buildings and Landscapes with Tree-Ring Analysis, 1st eds.. Routledge: London. 2019. 302 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781315145679>.
3. Bernabei M., Martinelli N., Cherubini P. Tree-Ring Analysis on Wooden Artifacts: What Can It Tell Us? In Nanotechnologies and Nanomaterials for Diagnostic, Conservation, and Restoration of Cultural Heritage, Lazzara G., Fakhruddin R. (eds.). Elsevier. 2019. 111-125. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813910-3.00006-9>.
4. Ljungqvist F. C., Thejll P., Björklund J., Gunnarson B. E., Piermattei A., Rydval M., Seftigen K., Støve B., Büntgen U. Assessing non-linearity in European temperature-sensitive tree-ring data. *Dendrochronologia*. 2020. 59: 125652. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2019.125652>.
5. Büntgen U., Arseneault D., Boucher E. Recognising bias in Common Era temperature reconstructions. *Dendrochronologia*. 2022. 74: 125982. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2022.125982>.
6. Dendroecology. Tree-Ring Analyses Applied to Ecological Studies. Amoroso M. M., Daniels L. D., Baker P. J., Camarero J. J. (eds.). Springer International Publishing AG. 2017. 231: 363 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-61669-8>.
7. Domínguez-Delmás M. Seeing the forest for the trees: New approaches and challenges for dendroarchaeology in the 21st century. *Dendrochronologia*. 2020. 62: 125731. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125731>.
8. Pearl J. K., Keck J. R., Tintor W., Siekacz L., Herrick H. M., Meko M. D., Pearson C. L. New frontiers in tree-ring research. *The Holocene*. 2020. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1177/0959683620902230>.
9. Асадулаев З. М., Омарова О. К., Рамазанова З. К. Возрастные и климатические основы изменчивости годовичных колец *Taxus baccata* в предгорном Дагестане. *Лесотехнический журнал*. 2018. 8(2): 22–36. DOI: https://doi.org/10.12737/article_5b24060a7008c9.83626510. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/xrubrз>.
10. Вьюхина А. А., Гурская М. А. Интенсивность отражения синего (blue intensity): дендроклиматический потенциал сосны, произрастающей на севере Фенноскандии // *Журн. Сиб. федер. ун-та. Биология*. 2022. 15(2): 244–263. DOI: <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0385>. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/xzzgdc>.
11. Buckley B. M., Hansen K. G., Griffin K. L., Schmiege S., Oelkers R., D'Arrigo R. D., Stahle D. K., Davi N., Nguyen T. Q. T., Le C. N., Wilson R. J. S. Blue intensity from a tropical conifer's annual rings for climate reconstruction: An ecophysiological perspective. *Dendrochronologia*. 2018. 50: 10-22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2018.04.003>.
12. Matulewski P., Buchwal A., Gärtner H., Jagodziński A. M., Cufar K. Altered growth with blue rings: comparison of radial growth and wood anatomy between trampled and non-trampled scots pine roots. *Dendrochronologia*. 2022. 72(1-2): 125922. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2022.125922>.
13. Samusevich A., Lexa M., Vejpustková M., Altman J., Zeidler A. Comparison of methods for the demarcation between earlywood and latewood in tree rings of Norway spruce. *Dendrochronologia*. 2020. 60: 125686. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125686>.

14. Moghaddam M. S., den Bulcke J. V., Wälinder M. E. P., Claesson P. M., Acker J. V., Swerin A. Microstructure of chemically modified wood using X-ray computed tomography in relation to wetting properties. *Holzforschung*. 2017. 71(2): 119–128. DOI: <https://doi.org/10.1515/hf-2015-0227>.
15. Jacquin P., Longuetaud F., Leban J.-M., Mothe F. X-ray microdensitometry of wood: A review of existing principles and devices. *Dendrochronologia*. 2017. 42: 42–50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.01.004>.
16. Alves E. E. N., Rodriguez D. R. O., Rocha P. A., Vergütz L., Junior L. S., Hesterberg D., Pessenda L. C. R., Tomazello-Filho M., Costa L. M. Synchrotron-based X-ray microscopy for assessing elements distribution and speciation in mangrove tree-rings. *Results in Chemistry*. 2021. 3: 100121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2021.100121>.
17. Kang X., Kirui A., Widanage M. C. D., Mentink-Vigier F., Cosgrove D. J., Wang T. Lignin-polysaccharide interactions in plant secondary cell walls revealed by solid-state NMR. *Nat. Commun.* 2019. 10: 347. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08252-0>.
18. Chen C., Kuang Y., Zhu S., Burgert I., Keplinger T., Gong A., Li T., Berglund L., Eichhorn S. J., Hu L. Structure–property–function relationships of natural and engineered wood. *Nat. Rev. Mater.* 2020. 5: 642–666. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41578-020-0195-z>.
19. Рунова Е. М., Гарус И. А., Мухачева А. Н. Применение инструментальных методов при оценке состояния стволов *Pinus sylvestris* L. Лесотехнический журнал. 2020. 10(3): 72–85. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.3/8>. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/mkwogv>.
20. Головин Ю. И. Наноиндентирование и его возможности. Москва: Машиностроение, 2009. – 312 с. ISBN 978-5-94275-476-1. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/raydmx>.
21. Головин Ю.И., Тюрин А.И., Асланян Э.Г., Пирожкова Т.С., Васюков В.М. Физико-механические свойства и микромеханизмы локального деформирования материалов с различной зависимостью твердости от глубины отпечатка. *Физика твердого тела*. 2017. 59(9): 1778-1786. DOI: <https://doi.org/10.21883/0000000000>. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29973088>.
22. Golovin Yu. I., Gusev A. A., Golovin D. Yu., Matveev S. M., Tyurin A. I., Samodurov A. A., Korenkov V. V., Vasyukova I. A., Yunack M. A. Multiscale wood micromechanics and size effects study via nanoindentation. *Journal of Bioresources and Bioproducts*. 2023. 8(3): 246-264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2023.04.002>.
23. Головин Ю.И., Тюрин А.И., Гусев А.А., Матвеев С.М., Головин Д.Ю., Самодуров А.А., Васюкова И.А., Юнак М.А., Колесников Е.А., Захарова О.В. Локальные механические свойства и кольцевая структура древесины, исследованные методом сканирующего наноиндентирования // *Журнал технической физики*. 2022. 92(4): 575-587. DOI: <https://doi.org/10.21883/JTF.2022.04.52245.297-21>. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48022954>.
24. Vaganov E. A., Hughes M. K., Silkin P. P., Nesvetailo V. D. The Tunguska Event in 1908: Evidence from Tree-Ring Anatomy. *Astrobiology*. 2004. 4(3): 391-399. DOI: <https://doi.org/10.1089/ast.2004.4.391>.
25. Silkin P. P., Kirryanov A. V., Krusic P. J., Ekimov M. V., Barinov V. V., Büntgen U. A new approach to measuring tree-ring density parameters. *J. Sib. Fed. Univ. Biol.* 2022. 15(4): 441-455. DOI: <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0397>.

References

1. Frank D., Fang K., Fonti P. *Dendrochronology: Fundamentals and Innovations*. In *Stable Isotopes in Tree Rings*, Siegwolf R. T. W., Brooks J. R., Roden J., Saurer M. (eds.). Springer: Cham. 2022. 8: 21-59. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-92698-4_2.
2. Rubino D. L., Baas C. *Dating Buildings and Landscapes with Tree-Ring Analysis*, 1st eds.. Routledge: London. 2019. 302 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781315145679>.
3. Bernabei M., Martinelli N., Cherubini P. *Tree-Ring Analysis on Wooden Artifacts: What Can It Tell Us?* In *Nanotechnologies and Nanomaterials for Diagnostic, Conservation, and Restoration of Cultural Heritage*, Lazzara G., Fakhruddin R. (eds.). Elsevier. 2019. 111-125. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813910-3.00006-9>.

4. Ljungqvist F. C., Thejll P., Björklund J., Gunnarson B. E., Piermattei A., Rydval M., Seftigen K., Støve B., Büntgen U. Assessing non-linearity in European temperature-sensitive tree-ring data. *Dendrochronologia*. 2020. 59: 125652. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2019.125652>.
5. Büntgen U., Arseneault D., Boucher E. Recognising bias in Common Era temperature reconstructions. *Dendrochronologia*. 2022. 74: 125982. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2022.125982>.
6. *Dendroecology. Tree-Ring Analyses Applied to Ecological Studies*. Amoroso M. M., Daniels L. D., Baker P. J., Camarero J. J. (eds.). Springer International Publishing AG. 2017. 231: 363 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-61669-8>.
7. Domínguez-Delmás M. Seeing the forest for the trees: New approaches and challenges for dendroarchaeology in the 21st century. *Dendrochronologia*. 2020. 62: 125731. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125731>.
8. Pearl J. K., Keck J. R., Tintor W., Siekacz L., Herrick H. M., Meko M. D., Pearson C. L. New frontiers in tree-ring research. *The Holocene*. 2020. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1177/0959683620902230>.
9. Asadulaev Z. M., Omarova O. K., Ramazanova Z. R. Age and climatic bases of variability of annual growth rings of *Taxus baccata* in foothill Dagestan. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2018. 8(2): 22-36. (in Russian) DOI: https://doi.org/10.12737/article_5b24060a7008c9.83626510.
10. Vyukhina A. A., Gurskaya M. A. Dendroclimatic potential of blue intensity-based chronologies of northern Fennoscandia Scots pine. *J. Sib. Fed. Univ. Biol.* 2022 15(2): 244–263. DOI: <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0385>.
11. Buckley B. M., Hansen K. G., Griffin K. L., Schmiede S., Oelkers R., D'Arrigo R. D., Stahle D. K., Davi N., Nguyen T. Q. T., Le C. N., Wilson R. J. S. Blue intensity from a tropical conifer's annual rings for climate reconstruction: An ecophysiological perspective. *Dendrochronologia*. 2018. 50: 10-22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2018.04.003>.
12. Matulewski P., Buchwal A., Gärtner H., Jagodziński A. M., Cufar K. Altered growth with blue rings: comparison of radial growth and wood anatomy between trampled and non-trampled scots pine roots. *Dendrochronologia*. 2022. 72(1-2): 125922. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2022.125922>.
13. Samusevich A., Lexa M., Vejpusková M., Altman J., Zeidler A. Comparison of methods for the demarcation between earlywood and latewood in tree rings of Norway spruce. *Dendrochronologia*. 2020. 60: 125686. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125686>.
14. Moghaddam M. S., den Bulcke J. V., Wälinder M. E. P., Claesson P. M., Acker J. V., Swerin A. Microstructure of chemically modified wood using X-ray computed tomography in relation to wetting properties. *Holzforschung*. 2017. 71(2): 119–128. DOI: <https://doi.org/10.1515/hf-2015-0227>.
15. Jacquin P., Longuetaud F., Leban J.-M., Mothe F. X-ray microdensitometry of wood: A review of existing principles and devices. *Dendrochronologia*. 2017. 42: 42–50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.01.004>.
16. Alves E. E. N., Rodriguez D. R. O., Rocha P. A., Vergütz L., Junior L. S., Hesterberg D., Pessenda L. C. R., Tomazello-Filho M., Costa L. M. Synchrotron-based X-ray microscopy for assessing elements distribution and speciation in mangrove tree-rings. *Results in Chemistry*. 2021. 3: 100121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2021.100121>.
17. Kang X., Kirui A., Widanage M. C. D., Mentink-Vigier F., Cosgrove D. J., Wang T. Lignin-polysaccharide interactions in plant secondary cell walls revealed by solid-state NMR. *Nat. Commun.* 2019. 10: 347. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08252-0>.
18. Chen C., Kuang Y., Zhu S., Burgert I., Keplinger T., Gong A., Li T., Berglund L., Eichhorn S. J., Hu L. Structure–property–function relationships of natural and engineered wood. *Nat. Rev. Mater.* 2020. 5: 642–666. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41578-020-0195-z>.
19. Runova E. M., Garus I. A., Mukhacheva A. N. Application of instrumental methods in trunks assessment of *Pinus sylvestris* L. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry Engineering Journal]. 2020. 10(3): 72-85. (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.3/8>.
20. Golovin Y. I. Nanoindentation and its capabilities. *Maschinostroenie*: Moscow, Russia. 2009. - 312 p. ISBN 978-5-94275-476-1. (In Russ.)

21. Golovin Yu.I., Tyurin A.I., Aslanyan E.G., Pirozhkova T.S., Vasyukov V.M. The physical and mechanical properties and local deformation micromechanisms in materials with different dependence of hardness on the depth of print. *Physics of the Solid State*. 2017. 59(9): 1803-1811. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063783417090104>.

22. Golovin Yu. I., Gusev A. A., Golovin D. Yu., Matveev S. M., Tyurin A. I., Samodurov A. A., Korenkov V. V., Vasyukova I. A., Yunack M. A. Multiscale wood micromechanics and size effects study via nanoindentation. *Journal of Bioresources and Bioproducts*. 2023. 8(3): 246-264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2023.04.002>.

23. Golovin Yu. I., Tyurin A. I., Gusev A. A., Matveev S. M., Golovin D. Yu., Samodurov A. A., Vasyukova I. A., Yunak M.A., Kolesnikov E. A., Zakharova O. V. Scanning naation as an instrument of studying local mechanical properties distribution in wood and a new technique for dendrochronology. *Technical Physics*. 2022. 67(4): 484-495. DOI: <https://doi.org/10.21883/TP.2022.04.53605.297-21>.

24. Vaganov E. A., Hughes M. K., Silkin P. P., Nesvetailo V. D. The Tunguska Event in 1908: Evidence from Tree-Ring Anatomy. *Astrobiology*. 2004. 4(3): 391-399. DOI: <https://doi.org/10.1089/ast.2004.4.391>.

25. Silkin P. P., Kirryanov A. V., Krusic P. J., Ekimov M. V., Barinov V. V., Büntgen U. A new approach to measuring tree-ring density parameters. *J. Sib. Fed. Univ. Biol.* 2022. 15(4): 441-455. DOI: <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0397>.

Сведения об авторах

✉ *Тюрин Александр Иванович* – кандидат ф.-м. наук, зам. директора научно-исследовательского института «Нанотехнологии и наноматериалы» ФГБОУ ВО «Тамбовский Государственный Университет имени Г.Р. Державина», ул. Интернациональная, 33, г. Тамбов, Российская Федерация, 392000, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8020-2507>, e-mail: tyurinalexander@yandex.ru

Самодуров Александр Алексеевич – кандидат ф.-м. наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского института «Нанотехнологии и наноматериалы» ФГБОУ ВО «Тамбовский Государственный Университет имени Г.Р. Державина», ул. Интернациональная, 33, г. Тамбов, Российская Федерация, 392000, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9600-8140>, e-mail: samsasha@yandex.ru

Головин Дмитрий Юрьевич – кандидат т. наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского института «Нанотехнологии и наноматериалы» ФГБОУ ВО «Тамбовский Государственный Университет имени Г.Р. Державина», ул. Интернациональная, 33, г. Тамбов, Российская Федерация, 392000, e-mail: tarlin@yandex.ru

Юнак Мария Александровна – научный сотрудник научно-исследовательского института «Нанотехнологии и наноматериалы» ФГБОУ ВО «Тамбовский Государственный Университет имени Г.Р. Державина», ул. Интернациональная, 33, г. Тамбов, Российская Федерация, 392000, e-mail: mascha150383@mail.ru

Коренков Виктор Васильевич – кандидат ф.-м. наук, научный сотрудник научно-исследовательского института «Нанотехнологии и наноматериалы» ФГБОУ ВО «Тамбовский Государственный Университет имени Г.Р. Державина», ул. Интернациональная, 33, г. Тамбов, Российская Федерация, 392000, e-mail: ya.vikkor@yandex.ru

Баранчиков Петр Александрович – инженер научно-исследовательского института «Нанотехнологии и наноматериалы» ФГБОУ ВО «Тамбовский Государственный Университет имени Г.Р. Державина», ул. Интернациональная, 33, г. Тамбов, Российская Федерация, 392000, e-mail: nano@tsutmb.ru

Тюрин Владимир Александрович – ведущий специалист научно-исследовательского института «Нанотехнологии и наноматериалы» ФГБОУ ВО «Тамбовский Государственный Университет имени Г.Р. Державина», ул. Интернациональная, 33, г. Тамбов, Российская Федерация, 392000, e-mail: nano@tsutmb.ru

Куркина Наталья Михайловна – ведущий специалист научно-исследовательского института «Нанотехнологии и наноматериалы» ФГБОУ ВО «Тамбовский Государственный Университет имени Г.Р. Державина», ул. Интернациональная, 33, г. Тамбов, Российская Федерация, 392000, e-mail: nano@tsutmb.ru

Information about the authors

✉ *Alexander I. Tyurin* – Cand. Sci. (of Phys. and Mat.), Deputy Head of Institute for Nanotechnology and Nanomaterials G.R. Derzhavin Tambov State University, Internationalnaya srt., 33, Tambov, Russian Federation, 392000, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8020-2507>, e-mail: tyurinalexander@yandex.ru

Alexander A. Samodurov – Cand. Sci. (of Phys. and Mat.), Senior Researcher of Institute for Nanotechnology and Nanomaterials G.R. Derzhavin Tambov State University, Internationalnaya srt., 33, Tambov, Russian Federation, 392000, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9600-8140>, e-mail: samsasha@yandex.ru

Dmitrii Yu. Golovin – Cand. Sci. (of techn.), Senior Researcher of Institute for Nanotechnology and Nanomaterials G.R. Derzhavin Tambov State University, Internationalnaya srt., 33, Tambov, Russian Federation, 392000, e-mail: tarlin@yandex.ru

Mariya A. Yunak – Researcher of Institute for Nanotechnology and Nanomaterials G.R. Derzhavin Tambov State University, Internationalnaya srt., 33, Tambov, Russian Federation, 392000, e-mail: mascha150383@mail.ru

Viktor V. Korenkov – Cand. Sci. (of Phys. and Mat.), Researcher of Institute for Nanotechnology and Nanomaterials G.R. Derzhavin Tambov State University, Internationalnaya srt., 33, Tambov, Russian Federation, 392000, e-mail: ya.vikkor@yandex.ru

Petr A. Baranchikov – engineer of Institute for Nanotechnology and Nanomaterials G.R. Derzhavin Tambov State University, Internationalnaya srt., 33, Tambov, Russian Federation, 392000, e-mail: nano@tsutmb.ru

Vladimir A. Tyurin – Leading Specialist of Institute for Nanotechnology and Nanomaterials G.R. Derzhavin Tambov State University, Internationalnaya srt., 33, Tambov, Russian Federation, 392000, e-mail: nano@tsutmb.ru

Natalia M. Kurkina – Leading Specialist of Institute for Nanotechnology and Nanomaterials G.R. Derzhavin Tambov State University, Internationalnaya srt., 33, Tambov, Russian Federation, 392000, e-mail: nano@tsutmb.ru

✉ – Для контактов/Corresponding author


Оригинальная статья


DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/4>

УДК 630*232



О лучших геоэкотипах сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) для искусственного лесовосстановления

Мария И. Михайлова¹✉, schaxina.mary@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0003-4767-8233>

Михаил П. Чернышов¹, lestaks53@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-6360-1135>

Сергей В. Ребко², rebko@belstu.by  <https://orcid.org/0000-0002-6892-2859>

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

²Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», ул. Свердлова, 13а, г. Минск, 220006, Республика Беларусь

Основой для корректировки ранее установленных границ лесосеменных районов для лесобразующих пород служат результаты изучения состояния, напряженности роста и продуктивности их потомств в виде лесных географических культур, которые создавались в 1960-1970-х годах в разных регионах СССР. Лучшие геоэкотипы выявляются путем сравнения морфометрических параметров, достигнутых испытываемыми географическими потомствами к возрасту «приспевания», либо на основе многофакторного анализа при комплексной их оценке по совокупности критериев. В 2018-2021-х годах с целью выявления и отбора лучших геоэкотипов сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), перемещенных в Центральное Черноземье (Воронежская область), по потенциальной хозяйственной пригодности для устойчивого воспроизводства лесов в Европейской части РФ проведены комплексные исследования в 59-61-летних древостоях, являющихся семенными потомствами разных лесостепных и степных геоэкотипов. На 32 пробных площадях по единой методике по 12 оценочным критериям были определены перспективные, средне- и неперспективные геоэкотипы сосны *P. sylvestris*. Достоверно установлено, что среди 18-ти изученных лесостепных экотипов лучшими являются только четыре. Для внедрения их в лесокультурное производство нужно оптимизировать логистику заготовки семян лучших экотипов, выращивание из них стандартного посадочного материала и его посадку в соответствующих лесорастительных условиях. Согласно прогнозам, использование семян и посадочного материала селекционно лучших геоэкотипов *P. sylvestris* в будущем обеспечит прирастающий во времени накопительный лесоводственно-хозяйственный эффект и высокую экономическую эффективность в ходе реализации планов по устойчивому воспроизводству лесов в Европейской части РФ.

Ключевые слова: сосна обыкновенная; *Pinus sylvestris* L., культуры лесные географические; комплексная оценка; состояние, рост и продуктивность; лучшие лесостепные и степные экотипы; рейтинг перспективности.

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.


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


Для цитирования: Михайлова М. И. О лучших геоэкотипах сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) для искусственного лесовосстановления / М. И. Михайлова, М. П. Чернышов, С. В. Ребко // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 4 (52). – Ч. 1. – С. 58–71. – Библиогр.: с. 68–71 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/4>.

Поступила 14.11.2023. Пересмотрена 04.12.2023. Принята 05.12.2023. Опубликовано онлайн 29.12.2023.

Article

About the best geocotypes of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) for artificial reforestation

Maria I. Mikhailova¹✉, schaxina.mary@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0003-4767-8233>

Mikhail P. Chernyshov¹, lestaks53@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-6360-1135>

Siarhei U. Rabko², rebko@belstu.by  <https://orcid.org/0000-0002-6892-2859>

¹Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation

²Belarusian State Technological University, Sverdlova str., 13a, Minsk, 220006, Republic of Belarus

Abstract

The basis for adjusting the previously established boundaries of forest seed areas for forest-forming species are the results of studying the condition, growth intensity and productivity of their offspring in the form of forest geographical crops, which were created in the 60-70s of the XX century in different regions of the USSR. The best geocotypes are identified by comparing the morphometric parameters achieved by the test geographical offspring by the age of “ripening”, or on the basis of multifactor analysis with their comprehensive assessment based on a set of criteria. In 2018-2021 In order to identify and select the best geocotypes of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), moved to the Central Black Earth Region (Voronezh region), based on their potential economic suitability for sustainable forest reproduction in the European part of the Russian Federation, comprehensive studies were carried out in 59-61-year-old tree stands that are seed trees offspring of different forest-steppe and steppe geocotypes. On 32 trial plots, promising, medium and unpromising *P. sylvestris* geocotypes were determined using a unified methodology and 12 evaluation criteria. It has been reliably established that among the 18 forest-steppe ecotypes studied, only 4 are the best. To introduce them into silviculture production, it is necessary to optimize the logistics of procuring seeds of the best ecotypes, growing standard planting material from them and planting them in appropriate forest conditions. According to forecasts, the use of seeds and planting material, identified selectively the best geocotypes of *P. sylvestris* during the implementation of plans for the sustainable reproduction of future forests in the European part of the Russian Federation, will provide an accumulative silvicultural and economic effect that grows over time and high economic efficiency.

Keywords: Scots pine; *Pinus sylvestris* L., geographical forest crops; comprehensive assessment; condition, growth and productivity; the best forest-steppe and steppe ecotypes; prospect rating.

Funding: this study did not receive external funding.

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

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

For citation: Mikhailova M. I., Chernyshov M. P., Rabko S. U. (2023). About the best geocotypes of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) for artificial reforestation. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 4 (52), part 1, pp. 58-71 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/4>.

Received 14.11.2023. **Revised** 04.12.2023. **Accepted** 05.12.2023. **Published online** 29.12.2023

Введение

В разных регионах СССР в середине XX века по единой методике была с целью обоснова-

ния и установления границ лесосеменных районов главных лесобразующих пород (сосна, дуб, ель, пихта, лиственница) создана обширная сеть лесных географи-

ческих культур. В то время приоритетной задачей создания широко разветвленной плановой государственной сети географических культур главных древесных пород являлось изучение, выявление и отбор среди них лучших по параметрам семенных потомств от разных материнских насаждений, произраставших в территориально разноудаленных георегионах, где исторически в ходе эволюции сформировались определенные клима- и экотипы. В связи с этим сохранившиеся сегодня географические культуры – это не только научно-практическая основа действующего лесосеменного районирования, но и одновременно уникальная база для селекции хозяйственно-ценных видов [1]. Ныне приоритеты изменились. Ими стали улучшение качества, состояния и породного состава создаваемых лесов будущего, а также повышение продуктивности, устойчивости и биоразнообразия существующих лесов. Научкой доказано, что, изучая потомства разных экотипов в географических культурах с многофакторной оценкой их по комплексу био-, дендро- и морфометрических признаков, можно выявить лучшие геопопуляции для их дальнейшего широкого использования при лесовосстановлении по лесорастительным зонам страны РФ [1, 2, 3].

В разные годы XX века в Воронежской области были созданы географические культуры: лиственницы сибирской (*Larix sibirica* LEDEB.) профессором Дерюжкиным Р.И., дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) профессором Шутяевым А.М., сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) профессором Вересиныным М.М., березы повислой (*Betula pendula* ROTH) – профессором Поповым В.К. В Беларуси были созданы географические культуры *P. sylvestris* L. (1959 г.) и ели европейской (*Picea abies* (L.) H.KARST.) (1961 г.) под руководством доцента Манцевича Е.Д. [4-6]. Аналогичные работы и исследования проводились и за рубежом [6-8].

Исследования проводились в Воронежской области в 59-61-летних геокультурах *P. sylvestris* L. на лесокультурном полигоне «Ступинское поле» (рис. 1). Сеянцы были выращены из

семян урожая 1956 г. в местном питомнике и характеризуют разные гео-, и экопроисхождения в бывшем СССР [9, 10, 20].



Рисунок 1. Древоостой на ВПП №8-18

Figure 1. Tree stand on runway №8-18

Источник: собственная композиция авторов
Source: the authors' own photo.

С 1998 г. полигон имеет особый правовой статус: «памятник природы областного значения». К 2023 г. биологический возраст деревьев достиг 66 лет, а возраст географических культур – 64 лет.

Большинство видов рода сосен (*Pinus* L.), в том числе и сосна обыкновенная (*P. sylvestris* L.), из-за разнообразия их форм относятся к гетерогенным. Их морфологические признаки являются достаточно изменчивыми.

Предыдущие исследования показали, что часть главных компонентов или отдельные морфологические признаки не обеспечивают объективную оценку популяционной структуры и внутривидовой изменчивости геокультур [3, 12-14]. Так возникла острая потребность в комплексной их оценке на этапе приспевания по совокупности генетически обусловленных признаков, которые бы объективно отражали их текущее состояние, устойчивость и продуктивность, напряженность роста в новых по сравнению с материнскими насаждениями условиях произрастания.

Цель исследований – изучить и выявить на полигоне «Ступинское поле», включающем 245 блоков, лучшие среди лесостепных и степных экотипов потомства *P. sylvestris* на основе оценки их по 12 количественно-качественным признакам.

Материалы и методы исследования

Объект и предмет исследования

Объектом исследований служили 59-61-летние географические культуры сосны обыкновенной на полигоне «Ступинское поле», а предметом - их состояние, рост, продуктивность, селекционная и хозяйственная ценность.

Для достижения намеченной цели решали следующие задачи:

Дизайн эксперимента

Заложили на лесокультурном полигоне (51° 57' 33.5425" N, 39° 24' 26.7813" E) по единой методике [13]. в древостоях, сформировавшихся в условиях естественного отбора (без рубок ухода), серии равновеликих по размеру временных пробных площадей (ВПП).

Выполнили на ВПП сплошные перечеты деревьев по принятой в лесной таксации методике с измерением диаметров на высотах 0,0 м и 1,3 м с точностью 0,1 см вдоль и поперек их рядов. Выявили характер распределения деревьев по ступеням толщины и строения древостоев по диаметру;

Выполнили качественную, лесоводственно-хозяйственную и селекционную оценку деревьев степных и лесостепных экотипов сосны с выявлением по комплексу наиболее значимых признаков самых перспективных среди них для устойчиво-расширенного искусственного лесовосстановления в европейской части РФ.

Сравнили по экотипам ряды распределения деревьев по хозяйственно-технической годности и селекционной ценности (лучшие, нормальные, минусовые).

Изучили продуктивность и рост деревьев и древостоев степных и лесостепных экотипов *P. sylvestris*.

Оценили санитарное состояние деревьев по основным диагностическим признакам хвои, по величине текущего прироста побегов, по форме и разреженности крон, по наличию повреждений стволов, с распределением их на шесть категорий состояния согласно шкале «Правил санитарной безопасности в лесах» (утв. приказом Минприроды России от 20 мая 2017 г. № 607).

Анализ данных

Данные обмеров деревьев и оценка их состояния на 32 ВПП выполнены по действующим методикам и нормативам с использованием методов вариационной статистики и программы Microsoft Excel 2016.

Разработали квалиметрическую шкалу по комплексу оцениваемых критериев и определили ранги перспективности экотипов *P. sylvestris* для их применения при лесовосстановлении (табл. 1).

Выявили лучшие экотипы *P. sylvestris* на основе оценки их потомств по 12 критериям роста (табл. 1).

Таблица 1

Квалиметрическая шкала для оценки уровней рейтинга экотипов *P. sylvestris* L. в географических культурах

Table 1

Qualimetric scale for assessing the rating levels of *P. sylvestris* L. ecotypes in geographical cultures

Признаки для оценки уровня рейтинга лесных культур Signs for assessing the level of rating of forest crops	Изменения величин признаков древостоев лесных культур Changes in the values of characteristics of forest stands					
	Абсолютные величины признака Absolute characteristic values		Шаг между рангами Step between ranks	Значения величин признаков по уровням рейтинга, от до: Values of attribute values by rating levels, from.... before:		
	Миним. Min.	Максим. Max.		низкий low	средний average	высокий high
Средняя высота культур, м Average height of crops, m	16,5	27,2	4,0	16-20	20,1-24	24,1-28
Бонитет, (класс по шкале М.М. Орлова) Bonus, (class on the scale of M.M. Orlov)	II	Iб	I	II и ниже II and below	I	Ia и выше Ia and above

Природопользование

Средний прирост культур по высоте, м Average growth of crops in height, m	0,27	0,48	0,07	0,27-0,33	0,34-0,40	0,41-0,48
Полнота (относительная), ед. Completeness (relative), units.	0,3	1,2	0,3	0,3- 0,59	0,6-0,89	0,9-1,2
Сохранность деревьев, % Tree preservation, %	2,5	10,2	3,0	2-5,0	5,1-8,0	8,1-11,0
Коэффициент напряженности роста культур по H/D Growth tense coefficient of crop by H/D	0,730	1,164	0,15	0,71-0,85	0,86-1,01	1,02-1,165
Средний диаметр культур (D), см Average diameter of crops (D), cm	19,8	30,9	3,5	19,0-23,8	23,9-27,4	27,5-31,0
Прирост по диаметру (средний), см Increase in diameter (average), cm	0,32	0,51	0,06	0,30-0,36	0,37-0,4	0,41-0,52
Запас сырорастающей древесины, м ³ /га Raw-growing wood stock, m ³ /ha	79	583	200	менее 200	201-400-	более 401
Средний прирост культур по запасу, м ³ /га Average crop growth by stock, m ³ /ha	1,3	9,56	3,0	3,0 и менее	3,1-7,0	более 7,1
Селекционная оценка культур, балл Selection evaluation of crops, score	1,75	2,06	0,1	1,70-1,79	1,8-1,89	1,9-2,06
Санитарное состояние культур, балл Sanitary condition of crops, score	1,2	2,6	0,5	более 2,0	1,5-2,0	менее 1,5
Сумма баллов Sum of points				16-39	40-49	50 и более

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

По окончании вегетационных периодов 2018, 2019 и 2020 гг. в географических культурах на полигоне были заложены 18 ВПП в лесостепных экотипах и 14 ВПП – в степных экотипах [12, 16, 17]. Всего было заложено 32 ВПП, где у деревьев измерили мерной вилкой (АДС-Лаб, точность 1 мм) диаметры на высоте 0,0 м и 1,3 м от уровня почвы, а также оценены по типовой методике [12] их состояние, селекционная ценность и хозяйственная годность.

При разработке матрицы оценочной шкалы на основе выявленных реальных количественных различий между минимальными и максимальными значениями у 12 оцениваемых признаков всей совокупности древостоев лесостепных и степных экотипов на 32 ВПП было установлено, что оптимальное число уровней рангов для каждого признака в рейтинге должно быть не менее трех штук. Для этого разницу между максимальными и минимальными

значениями каждого признака поделили на три равных части и определили разделительные границы трех рангов и интервалы между ними, с выделением трех статусных групп рейтинга, а именно: низкий, средний и высокий. Такой методический подход обоснования шкалы оценки позволил обеспечить как достоверность, так и объективность сравнения величин применяемых признаков в установлении рейтинга древостоев разных экотипов *P. sylvestris*, а также при определении их средневзвешенного рейтинга по совокупности всех 12-ти признаков. Вместе с тем, предстоит дополнительно установить «вес» каждого из 12-ти признаков, рассчитать поправочные коэффициенты к ним и определить их иерархическую структуру.

Теоретически, согласно предложенной шкале, максимальная сумма баллов по совокупности 12-ти признаков оценки для экотипов с высоким

уровнем рейтинга должно составить 50 баллов и более, у экотипов со средним рейтингом – 40-49 баллов и с низким – менее 40 баллов. При необходимости, в том числе из-за возможных более весомых с возрастом геокультур различий фактических минимальных и максимальных величин признаков оценки других геоэкотипов), в предложенную нами 3-ранговую шкалу оценки экотипов можно добавить промежуточные статусные группы рейтинга, например, очень высокий и очень низкий.

Текущая лесотаксационная характеристика потомств лесостепных и степных экотипов сосны, установленная при камеральной обработке данных 32 ВПП, представлена в работах [12, 16, 17]. В них отражены специфические лесоводственные особенности структурных накопительных и деструктивных процессов, произошедших в разных геоэкотипах *P. sylvestris* как на уровне вида, так и на уровне микропопуляций, которые свидетельствуют о разных по величине уровнях изменчивости хода роста семенных потомств тех или иных экотипов.

Результаты и их обсуждение

Термин «экотип» в применении к изучаемым географическим лесным культурам трактуется нами как: «Экотип – это микропопуляция или совокупность деревьев одного вида известного географического происхождения, растущая на определенном лесном участке с однородными лесорастительными условиями».

В основе семеноводства *P. sylvestris*, в том числе и популяционного, лежит групповой и массовый отбор лучших особей или их групп с оценкой перспектив использования отобранных популяций и экотипов на практике. Исходя из этого научный интерес в решении текущих задач лесного семеноводства на практике представляют собой новейшие знания по изменчивости наследственно (или генетически) предопределенных качественных и количественных показателей и признаков вида в той или иной геопопуляции. По мнению П.Г. Мельника и др. [18, 19] к числу таких признаков относятся: качество и урожайность семян *P. sylvestris*, качество стволов деревьев и технические свойства древесины, устойчивость к разным факторам среды, продуктивность биомассы и др. При анализе всех упомянутых выше показателей важно, чтобы сравниваемые экотипы

произрастали в одинаковых типах лесорастительных условий. Этому важному и непреложному научно-методическому требованию полностью соответствуют исследуемые нами геокультуры *P. sylvestris*.

Характеристики основных количественных и качественных признаков геокультур сосны на ВПП [12, 13, 16, 17] позволяют выделить следующие их специфические лесоводственные особенности.

Во-первых, разная сохранность деревьев к 65 годам из-за начально чрезмерной перегущенности культур при их создании ($\approx 13,0$ тыс. семян/га). До и после смыкания культуры формировались в ходе естественного отбора (лесоводственные уходы не проводили, удаляли лишь усохшие деревья).

Во-вторых, установлено, что к 59-61-летнему возрасту в семенных потомствах лесостепных экотипов, занимающих аналогичные со степными экотипами условия местопроизрастания, максимальной сохранность деревьев составила 3,5 % (Хреновской из Воронежской обл.) и 0,2 % (Б. Сталинский из Курской обл.). Соответственно сохранность деревьев в степных экотипах равна 7,5 % (Б. Михайловский из Днепропетровской обл.) и 2,5 % (Рахинский из Волгоградской обл.).

В-третьих, для величин морфометрических признаков древостоев лесостепных и степных экотипов *P. sylvestris* в геокультурах характерно достаточно высокое их варьирование. Так, в лесостепных экотипах средние приросты деревьев по диаметру на 1,3 м от поверхности почвы в абсолютных величинах составили 0,15-0,50 мм, а в степных экотипах – диапазон уже - 0,32-0,51 мм. Статистически различия в приростах ощутимые.

В-четвертых, сложившаяся в оценке текущего санитарного состояния семенных потомств групп лесостепных и степных экотипов *P. sylvestris* ситуация неоднозначна. Так, баллы оценки состояния первых превосходят баллы у вторых. Для лесостепных экотипов средний балл санитарного состояния равен 1,5 (варьируя от 1,2 до 2,2 балла), а для степных – 1,8 балла (варьируя от 1,2 до 2,6 балла).

В-пятых, на 32-х ВПП в геоэкотипах *P. sylvestris* встречались древостои Ia, I и II классов бонитета, но в разных сочетаниях. Установлено, что на 1-ной ВПП у лесостепных экотипов потомства растут

по Ib классу бонитета, на 15-ти – по Ia классу и на 2-х – по I классу бонитета. У степных экотипов потомства на 4-х ВПП характеризуются Ia классом, на 6-ти – I, на 4-х – II классом бонитета.

В-шестых, у лесостепных экотипов абсолютные величины средних высот меняются от 21,9 до 27,2 м, а средние приросты по высоте – от 0,32 м до 0,46 м. Относительная полнота варьирует от 0,6 до 1,2 единиц. В степных экотипах на 14-ти ВПП средняя высота древостоев колеблется от 16,5 до 25,3 м, средний прирост по высоте – от 0,27 до 0,48 м, относительная полнота – от 0,3 до 1,2 ед.

В-седьмых, выявленные различия абсолютных величин главных морфометрических показателей комплексной оценки древостоев лесостепных и

степных экотипов, переходящих с возрастом в стадию их «приспеивания», а также их изменчивость обусловили разные перспективы их использования при организации и осуществлении искусственного лесовосстановления в Европейской части РФ.

В табл. 2 показаны суммарные рейтинги первого поколения семенных потомств 18-ти лесостепных и 14-ти степных экотипов *P. sylvestris* по совокупности 12-ти главных оценочных признаков, характеризующих их потенциал и перспективность использования при осуществлении искусственного лесовосстановления при создании лесов будущего.

Таблица 2

Сравнительный рейтинг перспективности разных экотипов сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) в геокультурах по комплексу оценочных признаков

Table 2

Comparative rating of the prospects of different ecotypes of Scots pine (*P. sylvestris* L.) in geographical forest cultures by a set of evaluation features

№ВПП и год их закладки Runway and the year they were laid	№ блока экотипа на полигоне No. of ecotype block at the land-fill	Места заготовки семян экотипов <i>P. sylvestris</i> L. (область, лесхоз, лесничество бывшего СССР на 1.01.1957 г.) Places of harvesting seeds of <i>P. sylvestris</i> L. ecotypes (region, forestry, forestry of the former USSR on 01.01.1957)	Рейтинг перспективности экотипов для искусственного лесовосстановления (сумма баллов по убыванию) Rating of the prospects of ecotypes for artificial reforestation (the sum of points in descending order)		
			высокий high	средний average	низкий low
Семенные потомства лесостепных экотипов Seed progeny of forest-steppe ecotypes					
14-19	82	Орловская обл., Сталинское л-во Orel region, Stalinist l-vo	56 (●+++)	-	-
4-18	75	Липецкая обл., Колодезское л-во Lipetsk region, Kolodezskoe l-vo	54 (●++)	-	-
5-20	76	Липецкая обл., Балашовское л-во Lipetsk region, Balashovskoe l-vo	52 (●++)	-	-
7-20	68	Белгородская обл., Уразовское л-во Belgorod region, Urazovskoe l-vo	52 (●++)	-	-
9-18	70	Курская обл., Б. Сталинское л-во Kursk region, B. Stalinskoe l-vo	52 (●++)	-	-
10-18	185	Брянская обл., Краснослободское л-во Bryansk region, Krasnoslobodskoe l-vo	52 (●++)	-	-
2-18	74	Воронежская обл., Бычковское л-во Voronezh region, Bychkovskoe l-vo	50 (●+)	-	-
16-20	60	Черкасская обл., Совиевское л-во Cherkasy region, Sofiyivskoe l-vo	50 (●+)	-	-
18-20	64	Сумская обл., Грузское л-во Sumy region, Georgian l-vo	50 (●+)	-	-

Природопользование

№ВПП и год их закладки Runway and the year they were laid	№ блока экотипа на полигоне No. of ecotype block at the landfill	Места заготовки семян экотипов <i>P. sylvestris</i> L. (область, лесхоз, лесничество бывшего СССР на 1.01.1957 г.) Places of harvesting seeds of <i>P. sylvestris</i> L. ecotypes (region, forestry, forestry of the former USSR on 01.01.1957)	Рейтинг перспективности экотипов для искусственного лесовосстановления (сумма баллов по убыванию) Rating of the prospects of ecotypes for artificial reforestation (the sum of points in descending order)		
			высокий high	средний average	низкий low
12-19	102	Пензенская обл., Монастырское л-во Penza region, Monastic l-vo	-	48 (●-)	-
15-20	84	Рязанская обл., Мурманское л-во Ryazan region, Murmansk l-vo	-	46 (●-)	-
8-18	88	Тамбовская обл., Платоновское л-во Tambov region, Platonovskoe l-vo	-	46 (●-)	-
13-19	81	Орловская обл., Хатынецкое л-во Oryol region, Khotynets, l-vo	-	46(●-)	-
6-18	69	Белгородская обл., Шаталовское л-во Belgorod region, Shatalovskoe l-vo	-	44 (●--)	-
1-18	72	Воронежская обл., Хреновское л-во Voronezh region, Khrenovskaya l-vo	-	44 (●--)	-
3-20	74	Воронежская обл., Борское л-во Voronezh region, Borskoe l-vo	-	42 (●---)	-
11-19	262	Московская обл., Каширский л-з Moscow region, Kashirsky l-z	-	-	38 (●)
17-20	259	Полтавская обл., Зеньковское л-во Poltava region, Zenkovskoe l-vo	-	-	38 (●)
Семенные потомства степных экотипов Seed progeny of steppe ecotypes					
23-20	13	Луганская обл., Песчаное л-во Luhansk region, Sandy lake	-	48 (●-)	-
31-20	219	Краснодарский край, Мезмайское л-во Krasnodar Territory, Mezmayskoye l-vo	-	48 (●-)	-
26-20	8	Днепропетровская обл., Б-Михайловское л-во Dnepropetrovsk region, B-Mikhailovskoe l-vo	-	46 (●-)	-
29-20	9	Донецкая обл., Александровское л-во Donetsk region, Alexandrovskoe l-vo	-	42 (●---)	-
25-20	7	Днепропетровская обл., Кировское л-во Dnepropetrovsk region, Kirovskoe l-vo	-	42 (●---)	-
24-20	14	Луганская обл., Ново-Айдаровское л-во Luhansk region, Novo-Aidarovo l-vo	-	-	38 (●)
30-20	51	Киевская обл., Жукинское л-во Kiev region, Shchukinskoe l-vo	-	-	38 (●)
32-18	22	Южно-Осетинская АО, Гуфта-Гихатурское л-во South Ossetian JSC, Gufta-Gihaturskoe l-vo	-	-	38 (●)
27-19	6	Днепропетровская обл., Новомосковское л-во Dnepropetrovsk region, Novomoskovskoe l-vo	-	-	36 (●)
22-20	26	Волгоградская обл., Арчединский л-з Volgograd region, Archedinsky l-z	-	-	32 (●)
19-20	260	Саратовская обл., Петровский л-з Saratov region, Petrovsky l-z	-	-	30 (●)
28-20	4/5	Херсонская обл., Цурюпинское л-во	-	-	30 (●)

№ВПП и год их закладки Runway and the year they were laid	№ блока экотипа на полигоне No. of ecotype block at the landfill	Места заготовки семян экотипов <i>P. sylvestris</i> L. (область, лесхоз, лесничество бывшего СССР на 1.01.1957 г.) Places of harvesting seeds of <i>P. sylvestris</i> L. ecotypes (region, forestry, forestry of the former USSR on 01.01.1957)	Рейтинг перспективности экотипов для искусственного лесовосстановления (сумма баллов по убыванию) Rating of the prospects of ecotypes for artificial reforestation (the sum of points in descending order)		
			высокий high	средний average	низкий low
		Kherson region, Tsurupinskoe l-vo			
20-20	261	Саратовская обл., Дьяковское л-во Saratov region, Dyakovskoe l-in	-	-	26 (●)
21-20	87	Волгоградская обл., Рахинское л-во Volgograd region, Rakhinskoe l-vo	-	-	16 (●)

Примечание: л-во – лесничество; (●) – экотип рекомендован для искусственного лесовосстановления, (●) – нежелательно использовать, (●) – запрещается; кол-во знаков «+» – степень предпочтительности экотипа, кол-во знаков «-» – степень нежелательности.

Примечание: l-vo – forestry; (●) – ecotype is recommended for artificial reforestation, (●) – it is undesirable to use, (●) – prohibited; quantity «+» – degree of preference, quantity «-» – degree of undesirability;

Источник: собственные вычисления авторов.

Source: own calculations

Структурно-качественное соотношение величин рейтингов перспективности потомств лесостепных и степных экотипов *P. sylvestris* по сумме баллов в их группах разное. Так, установлено, что среди изученных 18 лесостепных экотипов *P. sylvestris* высокий рейтинг, оцениваемый в 50-56 баллов, имеют 9 экотипов, средний (42-48 баллов) – 7 экотипов и низкий (16-38 баллов) – всего 2 экотипа. В группе из 14-ти изученных степных экотипов семенные потомства с высоким рейтингом вообще отсутствуют, но имеется 5 экотипов со средним рейтингом перспективности (42-48) и 9 экотипов с низким рейтингом (16-38 баллов). Использовать эти геоэкоотипы для осуществления искусственного лесовосстановления не целесообразно.

На рис. 2 в виде статистической Boxplot- диаграммы представлены текущие различия оценок рейтинга семенных потомств для групп лесостепных и степных экотипов *P. sylvestris*.

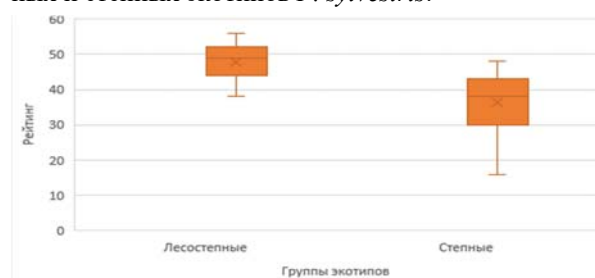


Рисунок 2. Обобщенные по 12 оценочным признакам средние рейтинги перспективности групп экотипов *P. sylvestris* L.

Figure 2. Average ratings of the prospects of groups of *P. sylvestris* L ecotypes summarized by 12 assessment characteristics

Источник: собственные вычисления авторов.

Source: own calculations

Различия рейтингов двух групп экотипов по 12 признакам (таблица 2) статистически достоверны ($t = 4,20 > 1.98$). а их характер отражает сложившаяся ситуация в 59-61-летних древостоях.

Выявленные на функционирующем полигоне в Воронежской области лучшие среди лучших по перспективности инорайонные и местные экотипы *P. sylvestris* – залог успеха растущего увеличения накопительного эффекта при устойчиво-расширенном создании в Европейской части РФ рукотворных сосновых лесов будущего с заданными свойствами.

В условиях глобального потепления климата лесоводам-практикам нужно всегда помнить как о ежегодной профилактике губительных лесных пожаров, так и неукоснительно соблюдать пожарную безопасность в хвойных лесах на требуемом высоком уровне.

В лесничествах Европейской части РФ с экономической и практической точек зрения недопустимо на землях фонда лесовосстановления в границах лесостепной лесорастительной зоны использовать семена *P. sylvestris* массового сбора, а также семена, заготовленные на плантациях средней и наихудшей селекционной ценности, либо в географических культурах из экотипов с недостаточной перспективностью, либо посадочный материал, выращенный из них.

С лесоводственно-хозяйственной и экономической точки зрения для создания в Европейской части РФ программно-целевых лесов будущего, а также для стабильного увеличения площади набирающих популярность карбоновых углерододепонирующих полигонов, либо для организации специализированных лесных фермерских хозяйств, равно как и для создания их инфраструктуры целесообразно использовать семена и посадочный материал только от лучших по перспективности экотипов *P. sylvestris*.

При дальнейшем продолжении исследований на полигоне географических культур желательно дополнительно определить текущий рейтинг экотипов сосны, перемещенных из других лесных районов и лесорастительных зон РФ (хвойно-широколиственные леса, южная тайга и др.), а также оптимизировать существующую логистику производственных связей между лесничествами всей триады звеньев лесовосстановления: начиная от прогноза целевого сбора качественных семян, последующего выращивания жизнеспособного посадочного материала до создания на незанятых лесом землях лесных культур на основе лучших отобранных экотипов.

Выводы

1. Сравнив абсолютные значения величин 12 оценочных признаков, установленных у разных геоэкоотипов *P. sylvestris*, оказалось, что лучшими из них являются только несколько. Это следующие экотипы (по уменьшению суммы набранных баллов оценки):

- группа из 18 лесостепных: Сталинский из Орловской обл. (P = 56 баллам) и Колодезский из

Липецкой обл. (P = 54 баллам), а также из Б. Сталинский из Курской обл. и Краснослободский экотип из Брянской обл. (их рейтинги = 52 баллам);

- группа из 14 степных: Песчаный экотип из Луганской обл. и Мезмайский из Краснодарского края (их рейтинги = 48 баллам). В группу лучших степные геоэкоотипы по сумме баллов не попали.

Худшие оценки на полигоне имеют потомства следующих экотипов:

- в группе лесостепных: Зеньковский экотип из Полтавской обл. и Каширский экотип из Московской обл. (их рейтинги по 38 баллов);

- в группе степных: Рахинский экотип из Волгоградской обл. (P = 16 баллов).

2. Для успешного достижения намеченных Правительством РФ на период до 2030 г. целей и эффективного решения текущих задач в сфере воспроизводства лесов в европейской части РФ рекомендуется использовать семена только лучших среди выявленных перспективных экотипов *P. sylvestris*, а также выращенный из них в лесных питомниках посадочный материал, включая сеянцы с открытой и с закрытой корневой системами.

3. Для оптимизации заготовки и переброски семян с учетом темпов происходящего глобального потепления климата можно ранее установленные границы лесосеменных районов на территории европейской части РФ сместить в северном направлении для лесостепных экотипов *P. sylvestris* на 70-100 км, а для степных экотипов – на 50-80 км.

Список литературы

1. Тараканов, В.В. Лесная селекция в России: достижения, проблемы, приоритеты (обзор) / В.В. Тараканов, М.М. Паленова, О.В. Паркина, Р.В. Роговцев, Р.А. Третьякова // Лесохозяйственная информация. -2021. №1. - С.100-143. DOI: <http://doi.org/10.24419/LHI2304-3083.2021/1/19>. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44850953>
2. Михайлова, М.И. Особенности строения географических лесных культур сосны обыкновенной по диаметру / М.И. Михайлова, М.П. Чернышов // Лесотехнический журнал. - 2021. - Т. 11, № 1 (41). - С. 46-55. - DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.1/4. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44938463>
3. Ахметов А. Р., О влиянии фрагментации широколиственных лесов на генетические ресурсы *Asper platanooides* L. в Республике Башкортостан / Боронникова С. В., Янбаев Ю. А, Нечаева Ю. И // Сибирский лесной журнал. 2021. № 4. С. 64–72. DOI: 10.15372/SJFS20210406 Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/>
4. Поплавская, Л. Ф. Оценка качества семенного и посадочного материала сосны обыкновенной, полученного на гибридно-семенной плантации / Л. Ф. Поплавская, С. В. Ребко, П. В. Тупик // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2018. – № 1(204). – С. 20-24. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/YPNZXK>.
5. Rabko, S. Comparative assessment of some physical and mechanical properties of wood of different Scots pine climatypes / S. Rabko, A. Kozel, I. Kimeichuk, V. Yukhnovsky // Scientific Horizons. – 24(2). – P. 27–36. DOI: [http://doi.org/10.48077/scihor.24\(2\).2021.27-36](http://doi.org/10.48077/scihor.24(2).2021.27-36).
6. Ребко, С.В. Рост географических культур ели европейской в условиях Белорусского лесосеменного района / С.В. Ребко, Л.Ф. Поплавская, П.В. Тупик // Лесное хозяйство: материалы 86-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, Минск, 31 января – 12 февраля 2022 г. – Минск: БГТУ, 2022. – С. 233–235. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48269316>.
7. Matisons, R., Jansone, D., Bāders, E., Dubra, S., Zeltiņš, P., Schneck, V., & Jansons, Ā. (2021). Weather-growth responses show differing adaptability of scots pine provenances in the south-eastern parts of baltic sea region. *Forests*, 12(12) doi:10.3390/f12121641
8. Bose, A. et al. The growth and resistance of Scots pine to extreme droughts in Europe depend on the growth conditions that preceded the drought // *Biology of global changes*. 2020; 26: 4521-4537. DOI: <http://doi.org/10.1111/gcb.15153>.
9. Yurttimaa, T. Performing ground-based laser scanning to characterize stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) grown under growing conditions depends on structural changes / T. Yurttimaa, N. Saarinen, V. Kankare, J. Heininen, S. Huuskonen, M. Holopainen, M. Huippa and M. Vastaranta // *Forest Journal of Photogrammetry Isprs and Remote*. 2020; 168: 277-287. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.08.017>.
10. Yrttimaa T., Multisensorial close-range sensing generates benefits for characterization of managed Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands / T. Yrttimaa, N. Saarinen, V. Kankare, N. Viljanen, J. Hynynen, S. Huuskonen, M. Holopainen, J. Huypä, E. Honkavaara and M. Vastaranta // *ISPRS Int. J. Geo-Information*. 2020; 9: 1–14. DOI: <http://doi.org/10.3390/ijgi9050309>.
11. Pritzel J., Falk V., Reger B. and Ul Pretsch G., Zimmermann L. Half a century of monitoring the ecosystem of the common pine forest reveals the long-term consequences of atmospheric deposition and climate change // *Biology of global changes*. 2020; 26: 5796-5815. DOI: <http://doi.org/10.1111/gcb.15265>.
12. Михайлова, М.И. Рост и продуктивность лесостепных и степных экотипов сосны обыкновенной в географических культурах / М.И. Михайлова // Актуальные направления научных исследований XXI века теория и практика. – 2019. - №3. - С. 166-171. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41567917>
13. Михайлова, М.И. Особенности роста и состояние лесостепных и степных экотипов сосны обыкновенной в географических культурах Воронежской области / М.И. Михайлова, М.П. Чернышов //

Лесотехнический журнал. - 2020. - Т. 10, № 2 (38). - С. 60-69. DOI: <http://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.2/6>.
Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43171813>

14. Stavrova, N., Gorshkov V., Katjutin P. and Bakkal I. The structure of northern siberian spruce–scots pine forests at different stages of post-fire succession / *Forests* 2020. 11(5) 558 doi: [org/10.3390/f11050558](https://doi.org/10.3390/f11050558)

15. Кулаков, Е.Е., Сиволапов, В.А., Воробьёва, Е.А., 2018 Генетическая изменчивость лиственницы Сукачева (*Larix sukaczewii* Djil.) в географических культурах под Воронежем *Лесотехнический журнал* 1 (29) с. 35-42 DOI: [10.12737/article_5ab0dfbc03a703.71494463](https://doi.org/10.12737/article_5ab0dfbc03a703.71494463)

16. Chernyshov, M. The structure in diameter and sanitary condition of geographical cultures of Scots pine and. / M. Chernyshov, M. Mikhailova / *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 875 (2021) 012054 doi:[10.1088/1755-1315/875/1/012054](https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012054)

17. Кузьмин, С.Р. Отбор перспективных климатипов сосны обыкновенной в географических культурах разных лесорастительных условий / С.Р. Кузьмин, Н.А. Кузьмина // *Лесоведение*. – 2020. – № 5. – С. 451–465 DOI: [10.31857/S0024114820050083](https://doi.org/10.31857/S0024114820050083)

18. Мерзленко, М.Д., Динамика роста сосны в старовозрастных древостоях сложного бора / М.Д. Мерзленко, Ю.Б. Глазунов, Ю.Г. Львов, Е.А. Перевалова // *Лесной журнал*. – 2018. - № 4 (364). – С.31-39. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: [10.17238/issn0536-1036.2018.4.31](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.4.31)

19. Мельник, П.Г. Рост и производительность Удмуртского климатипа сосны обыкновенной в условиях Подмосковья. / П.Г. Мельник, Ю.Б. Глазунов, М.Д. Мерзленко // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. – 2018. – №4 (51). – С. 66-71. DOI: [http://doi.org/10.12737/article_5c3de388d42682.75659629](https://doi.org/10.12737/article_5c3de388d42682.75659629). Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36916337>

20. Галдина, Т.Е. Внутривидовое разнообразие *Pinus sylvestris* L. в географических культурах Центральной лесостепи. / Т.Е. Галдина, А.И. Чернодубов, М.И. Михайлова // *Изв. вузов. Лесн. журн.* 2023. № 3. С. 84–98. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-84-98>. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53987625>

References

1. Tarakanov V. V., Palenova M.M., Parkina O.V., Rogovtsev R.V., Tretyakova R.A. Lesnaya selekciya v Rossii: dostizheniya, problemy, priority (obzor) [Forest breeding in Russia: achievements, problems, priorities (review)] *Lesnohozyajstvennaya informaciya [Forestry information]* 2021. No.1. – pp. 100-143. doi:[org/10.24419/LHI2304-3083.2021/1/19](https://doi.org/10.24419/LHI2304-3083.2021/1/19)

2. Mihajlova M. I., Chernyshov M. P. Osobennosti stroeniya geograficheskikh lesnyh kul'tur sosny obyknovnoy po diametru [Features of the structure of geographical forest crops of scots pine in diameter] *Lesotekhnicheskij zhurnal [Lesotechnicheskij zhurnal]*. - 2021. - Vol. 11, No. 1 (41). - pp. 46-55. DOI: [10.34220/issn.2222-7962/2021.1/4](https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.1/4).

3. Ahmetov A. R., Boronnikova S. V., Yanbaev YU. A., Nechaeva Y.U. O vliyani fragmentatsii shirokolistvennykh lesov na geneticheskie resursy *Acer platanoides* L. v Respublike Bashkortostan [On the effect of fragmentation of broad-leaf forests on the genetic resources of *Acer platanoides* L. in the Republic of Bashkortostan] *Sibirskij lesnoj zhurnal [Siberian Forest Journal]*. – 2021. - No. 4. - pp. 64-72. DOI: [10.15372/SJFS20210406](https://doi.org/10.15372/SJFS20210406)

4. Rebko S.V., Poplavskaya L.F., Tupik P.V. Sravnitel'naya harakteristika rosta geograficheskikh kul'tur sosny obyknovnoy (*Pinus sylvestris* L.) [Comparative characteristics of the growth of geographical cultures of scots pine (*Pinus sylvestris* L.)] *Molodezh' v nauke – 2007 : pril. k zhurn. «Vesci Nacyyanal'naj akademii navuk Belarusi» : v 4-h ch. [Youth in Science - 2007: adj. to the journal. "News of the National Academy of Sciences of Belarus": in 4 hours]* Belarusian Science, 2008 – Part 1: Series of Biological Sciences. Series of Medical Sciences. – pp. 231-236. <https://elib.belstu.by/handle/123456789/24536>

5. Rabko, S. Comparative assessment of some physical and mechanical properties of wood of different Scots pine climatotypes / S. Rabko, A. Kozel, I. Kimeichuk, V. Yukhnovsky // *Scientific Horizons*. – 24(2). – P. 27–36. DOI: [10.48077/scihor.24\(2\).2021.27-36](https://doi.org/10.48077/scihor.24(2).2021.27-36).

6. Rebko S.V., Poplavskaya L.F., Tupik P.V. Rost geograficheskikh kul'tur eli evropejskoj v usloviyah Belorusskogo lesosemennogo rajona [The growth of geographical cultures of European spruce in the conditions of the Belarusian forest-seeding area] *Lesnoe hozyajstvo: materialy 86-j nauchno-tekhnicheskoy konferencii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnyh sotrudnikov i aspirantov* [Forestry: Materials of the 86th Scientific and Technical Conference of the teaching staff, researchers and postgraduates] Minsk, January 31 – February 12, 2022 – Minsk: BSTU, 2022. – pp. 233-235. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48269316>
7. Matisons, R., Jansone, D., Bādērs, E., Dubra, S., Zeltiņš, P., Schneck, V., & Jansons, Ā. (2021). Weather–growth responses show differing adaptability of scots pine provenances in the south-eastern parts of baltic sea region. *Forests*, 12(12) doi:10.3390/f12121641
8. Bose, A. et al. The growth and resistance of Scots pine to extreme droughts in Europe depend on the growth conditions that preceded the drought / *Biology of global Changes* 2020. 2020 8 Pp. 4521-4537 DOI: 10.1111 / gcb. 15153
9. Yurttimaa, T. Performing ground-based laser scanning to characterize stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) grown under growing conditions depends on structural changes. *Forest Journal of Photogrammetry Isprs and Remote. / T. Yurttimaa, N. Saarinen, V. Kankare, J. Heininen, S. Huuskonen, M. Holopainen, M. Huippa and M. Vastaranta / 2020/ Sensing 168. pp. 277-287. DOI:10.1016/j.isprsjprs.2020.08.017*
10. Yrttimaa T. Multisensorial close-range sensing generates benefits for characterization of managed Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands. *ISPRS Int. J. Geo-Information. / T. Yrttimaa, N. Saarinen, V. Kankare, N. Viljanen, J. Hynynen, S. Huuskonen, M. Holopainen, J. Hyypä, E. Honkavaara and M. Vastaranta / 2020/ 9, pp. 1–14, doi:10.3390/ijgi9050309.*
11. Pritzel J., Falk V., Reger B. and Ul Pretsch G., Zimmermann L. Half a century of monitoring the ecosystem of the common pine forest reveals the long-term consequences of atmospheric deposition and climate change *Biology of global changes*. 2020 26 10 Pp. 5796-5815 DOI: 10.1111 / gcb .15265
12. Mihajlova M. I., Rost i produktivnost' lesostepnyh i stepnyh ekotipov sosny obyknovennoj v geograficheskikh kul'turah [Growth and productivity of forest-steppe and steppe ecotypes of scots pine in geographical cultures] / M. Mikhailova /. *Current directions of scientific research of the XXI century theory and practice. – Voronezh, 2019. №3. - pp.166-171. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41567917*
13. Mihajlova M. I., Chernyshov M. P . Osobennosti rosta i sostoyanie lesostepnyh i stepnyh ekotipov sosny obyknovennoj v geograficheskikh kul'turah Voronezhskoj oblasti [Features of growth and the state of forest-steppe and steppe ecotypes of scots pine in geographical cultures of the Voronezh region] *Lesotekhnicheskij zhurnal [Lesotechnicheskiy zhurnal]. - 2020. - Vol. 10, No. 2 (38). - pp. 60-69. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.2/6*
14. Stavrova, N I, The structure of northern siberian Spruce-Scots pine forests at different stages of post-fire succession. / N.I Stavrova, V.V. Gorshkov, P.N. Katjutin, I.J. Bakkal /. -*Forests*. 2020. 11 (5). -558. doi: org/10.3390/f11050558
15. Kulakov, E.E., Sivolapov, V.A., Vorob'yova, E.A. Geneticheskaya izmenchivost' listvennicy Sukacheva (*Larix sukaczewii* Djil.) v geograficheskikh kul'turah pod Voronezhem oblasti [Genetic variability of Sukachev's larch (*Larix sukaczewii* Djil.) in geographical cultures near Voronezh] *Lesotekhnicheskij zhurnal [Lesotechnicheskiy zhurnal]. – 2018 1 (29) c. 35-42 DOI: 10.12737/article_5ab0dfbc03a703.71494463*
16. Chernyshov, M. The structure in diameter and sanitary condition of geographical cultures of Scots pineand. / M. Chernyshov, M. Mikhailova /. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 875 (2021) 012054 doi:10.1088/1755-1315/875/1/012054
17. Kuz'min S.R. ., Kuz'mina N.A. Otbor perspektivnyh klimatipov sosny obyknovennoj v geograficheskikh kul'turah raznyh lesorastitel'nyh uslovij [Selection of promising climatypes of Scots pine in geographical cultures of different forest conditions] *Lesovedenie [Forest science]* 2020. No. 5. pp. 451-465. DOI: 10.31857/S0024114820050083

18. M.D. Merzlenko, YU.B. Glazunov, YU.G. L'vov, E.A. Perevalova Dinamika rosta sosny v starovozrastnykh drevostoyah slozhnogo bora [Dynamics of pine growth in old-age stands of complex forest] Lesn. zhurn. [Lesn. zhurn.] 2018. No. 4. pp. 31-39. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.4.31

19. Melnik P.G., Glazunov Yu.B. Merzlenko M.D. Rost i proizvoditel'nost Udmurtskogo klimatipa sosny obyknovnoy v usloviyah Podmoskovya [Growth and productivity of the Udmurt climatype of Scotch pine in the Moscow region] Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of Kazan State Agrarian University] – 2018. – No 4 (51). – pp. 66-71. DOI 10.12737/article_5c3de388d42682.75659629

20. Galdina T.E., Chernodubov A.I., Mihajlova M.I. Vnutrividovoe raznoobrazie Pinus sylvestris L. v geograficheskikh kul'turakh Central'noj lesostepi [Intraspecific diversity of Pinus sylvestris L. in geographical cultures of the Central forest-steppe] Izv. vuzov. Lesn. zhurn. [Izv. universities. Lesn. zhurn.] 2023. No. 3. pp. 84-98. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-84-98>.

Сведения об авторах

✉ *Михайлова Мария Игоревна* – кандидат сельскохозяйственных наук, преподаватель кафедры ботаники и физиологии растений ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: 0000-0003-4767-8233, e-mail: schaxina.mary@yandex.ru.

Чернышов Михаил Павлович – доктор с.-х. наук, профессор кафедры лесоводства, лесной таксации и лесоустройства ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: 0000-0001-6360-1135, e-mail: lestaks53@mail.ru.

Рибко Сергей Владимирович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой лесных культур и почвоведения, Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», ул. Свердлова, 13а, г. Минск, 220006, Республика Беларусь; <https://orcid.org/0000-0002-6892-2859>, e-mail: rebko@belstu.by.

Information about the authors

✉ *Maria I. Mikhailova* – Lecturer of the Department of Botany and Plant Physiology of the Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, RCID: 0000-0003-4767-8233, e-mail: schaxina.mary@yandex.ru.

Mikhail P. Chernyshov – Professor of the Department of forestry, forest taxation and forest management, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: 0000-0001-6360-1135 e-mail: lestaks53@mail.ru.

Siarhei U. Rabko – Cand. Sci. (Forestry), Docent, Head of the Department of Forest Crops and Soil Science, Educational Institution "Belarusian State Technological University", Sverdlova str., 13a, Minsk, 220006, Republic of Belarus, <https://orcid.org/0000-0002-6892-2859>, e-mail: rebko@belstu.by.

✉ – Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья


DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/5>


УДК 630*2 : (626.87 + 630*31)



Лесоводственная эффективность проведения несплошной лесозаготовки древесины в сосняках после гидротехнической мелиорации в Сокольском районе Вологодской области

Олег С. Попов¹✉, porovoleg81@gmail.com  <https://orcid.org/0000-0003-2464-1729>

Сергей В. Третьяков¹, s.v.tretyakov@narfu.ru  <https://orcid.org/0000-0001-5982-3114>

Анатолий С. Новосёлов², anser-rock-bard@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-6907-0424>

¹ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», набережная Северной Двины, 17, г. Архангельск, 163002, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», ул. Ленина, 15, г. Вологда, 160000, Российская Федерация

В Сокольском районе Вологодской области определено влияние проведения несплошной заготовки древесины в осушаемых сосняках на таксационные и макроструктурные параметры деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Объекты исследования представлены сосняками: главный вид – сосна обыкновенная (*P. sylvestris* L.) с примесью ели обыкновенной (*Picea abies* (L.) H.KARST.) и берёзы повислой (*Betula pendula* ROTR). Подобраны осушаемые лесные объекты после проведения несплошной заготовки древесины и контрольный древостой (без лесозаготовки), отграничены временные пробные площади (ВПП). Осушительные мероприятия в опытных лесах проводились в 1972 году. Несплошная лесозаготовка проводилась в 2005 году при присоединении трелёвочных технологических волоков к магистральному коридору под углом в 45 градусов. Распределение числа деревьев *P. sylvestris* L. по ступеням толщины в границах ВПП в 83 % ($p < 0.05$) случаев стремится к нормальному. Среднепериодический прирост поздней древесины *P. sylvestris* L. на ВПП после осушения возрос в приканальном положении на 30 % ($t_{\text{факт}} \geq t_{\text{ст}}$; $4,51 > 2,70$; $p < 0.01$), а после несплошной лесозаготовки увеличился на 19 % ($t_{\text{факт}} \geq t_{\text{ст}}$; $1,99 > 1,71$; $p < 0.1$). Проведение несплошной комплексной заготовки древесины в осушаемых сосняках оказывает положительное влияние на увеличение запаса (на 38 %), в то время как в древостоях без лесозаготовки – на 28 %.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, *Pinus sylvestris* L. гидротехническая мелиорация, выборочная заготовка древесины, ширина годичного кольца, поздняя древесина, запас древесины.

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.


Для цитирования: Попов О. С. Лесоводственная эффективность проведения несплошной лесозаготовки древесины в сосняках после гидротехнической мелиорации в Сокольском районе Вологодской области / О. С. Попов, С. В. Третьяков, А. С. Новосёлов // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 4 (52). – Ч. 1 – С. 72–91. – Библиогр.: с. 88–91 (23 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/5>.


Поступила 31.05.2023. Пересмотрена 26.11.2023. Принята 27.11.2023. Опубликована онлайн 29.12.2023

Article

Silvicultural efficiency of the partial cut in pine forests after hydro technical reclamation in the Sokolsky district of the Vologda region

Oleg S. Popov¹✉, popovoleg81@gmail.com  <https://orcid.org/0000-0003-2464-1729>

Sergey V. Tretyakov¹, s.v.tretyakov@narfu.ru  <https://orcid.org/0000-0001-5982-3114>

Anatoly S. Novoselov², anser-rock-bard@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-6907-0424>

¹FSAEI HE Lomonosov Northern (Arctic) Federal University, 17 Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation

¹FSBEI HE Vologda State University, 160000, 15 Lenina Street, Vologda, Russian Federation

Abstract

In the Sokolsky district of the Vologda region of Russian Federation, the influence of continuous harvesting of wood in drained pine forests on the taxation and macrostructural parameters of common pine trees (*Pinus sylvestris* L.) was determined. The objects of the study are represented by pine forests: the main species is Scots pine (*P. sylvestris* L.) with an admixture of common spruce (*Picea abies* (L.) H. KARST.) and birch (*Betula pendula* Roth). The drained forest objects were selected after the continuous harvesting of wood and a control stand (without logging), temporary test areas (runway) were delimited. Drainage measures in experimental forests were carried out in 1972. Continuous logging was carried out in 2005 when skidding technological drags were attached to the main corridor at an angle of 45 degrees. The distribution of the number of *P. sylvestris* L. trees by thickness steps within the boundaries of the runway in 83% ($p < 0.05$) of cases tends to normal. Average periodical growth of late wood *P. sylvestris* L. on the runway after drainage increased in the channel position by 30 % ($t_{\text{fact}} \geq t_{\text{st}}$; $4.51 > 2.70$; $p < 0.01$), and after intermittent logging increased by 19 % ($t_{\text{fact}} \geq t_{\text{st}}$; $1.99 > 1.71$; $p < 0.1$). Carrying out continuous complex harvesting of wood in drained pine forests has a positive effect on increasing the stock (by 38%), while in stands without logging – by 28 %.

Keywords: Scots pine, *Pinus sylvestris* L., hydro technical reclamation, selective fell, annual ring width, late wood, damp-growing wood stock.

Funding: this research received no external funding.

Acknowledgments: Authors thanks the reviewers for their contribution to the peer review.

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

For citation: Popov O. S., Tretyakov S. V., Novoselov A. S. (2023). Silvicultural efficiency of the partial cut in pine forests after hydro technical reclamation in the Sokolsky district of the Vologda region. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 4 (52), part 1, pp. 72-91 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/5>.

Received 31.05.2023. **Revised** 26.11.2023. **Accepted** 27.11.2023. **Published online** 29.12.2023.

Введение

На территории России сосредоточено около четверти всех лесов планеты. Российский лесной комплекс – опора устойчивого экономического развития страны [5]. Одной из приоритетных задач лесного хозяйства остаётся повышение продуктивно-

сти лесных насаждений [4, 7]. К наиболее эффективному лесохозяйственному мероприятию относится проектирование мелиоративной сети каналов на лесных заболоченных землях. Осушение почв на переувлажненных территориях посредством применения гидротехнической мелиорации оказывает комплекс-

ное влияние на изменения условий роста лесных фитоценозов на длительный временной период [12, 21].

При проведении гидролесоосушительной мелиорации происходит процесс трансформации почвы, вода в верхних слоях горизонта насыщается кислородом, образуя благоприятные условия для развития флоры и фауны, при этом также снижается уровень грунтовых вод [3, 5, 9]. При организации сети самотечных каналов улучшается товарная структура древостоев, повышается их бонитет, увеличиваются приросты древесины [20, 23]. Подтверждено, что осушаемые леса по запасам и товарности не уступают высокобонитетным насаждениям на дренированных почвах [17]. Бореальным лесам свойственны замедленные темпы роста, это обуславливает их отзывчивость на проведение мелиоративных работ при более высоком возрасте [17].

Более 40 % площади лесного фонда на территории Европейского Запада России занимают избыточно-увлажнённые почвы [17]. В регионе осушались преимущественно средневозрастные сосновые древостои (67 %) на верховом типе торфяной залежи [2]. В Вологодской области в период с 1953 по 1973 годы проводились работы по искусственному дренажу, следовательно, прошло более 50 лет, что даёт возможность получить полную оценку влияния проведения гидротехнической мелиорации на рост лесных насаждений.

В настоящее время мероприятия по проведению и поддержанию гидротехнической мелиорации в РФ почти полностью прекращены по ряду причин, в том числе экономическим, что приводит к полному прекращению их работы (оплыв бровок и зарастание каналов).

Эффективность гидролесоосушительной мелиорации, как одного из методов повышения продуктивности лесов, может быть увеличена применением в дополнение другими видами лесохозяйственных мероприятия, в том числе заготовкой древесины [5, 13]. Опыт проведения несплошной лесозаготовки в осушаемых условиях роста свидетельствует об увеличении приростов древесины в первые годы после её проведения [16, 18, 22]. Через один-два года после заготовки происходит заметное увеличение таксационных показателей, таких как

диаметр, высота и запас [1, 8, 13]. Наилучшие показатели отмечаются в насаждениях, пройденных лесозаготовкой интенсивностью до 20 % [15, 19].

Для сохранения породного состава при лесозаготовке необходимо оставлять молодое поколение *P. sylvestris* L. на доращивание, так как после проведения сплошной заготовки формируются в основном елово-березовые насаждения [6]. При оставлении молодого поколения *P. sylvestris* L. запас вырубленной древесины изменится незначительно, но при этом на территории формируются высокобонитетные сосново-еловые древостои [11, 17]. Несплошную заготовку древесины в осушаемых условиях роста рекомендуется применять при относительной полноте насаждений не менее 0,6 и запасе от 100 м³/га, при этом рекомендуемая доля высоковозрастных деревьев варьируется от 20 до 70 % [10, 14, 17].

Цель исследования – определить влияние проведения несплошной заготовки древесины на изменение сыро-растущих запасов и особенности прироста древесины в осушаемых сосняках Сокольского района Вологодской области.

Для достижения цели были сформулированы следующие *задачи*:

1) Получить распределение числа деревьев *P. sylvestris* L. по ступеням толщины в границах временных пробных площадей.

2) Определить среднепериодический прирост древесины *P. sylvestris* L. на объектах исследования по разным периодам влияния искусственного дренажа и несплошной заготовки древесины (с учётом расположения деревьев внутри пазух, оставленных на доращивание).

3) Определить влияние увеличения количества лет после заготовки на прирост древесины *P. sylvestris* L. по радиусу.

4) Выявить влияние последствий антропогенного влияния (осушение и несплошная рубка леса) на основные макроструктурные параметры древесины *P. sylvestris* L. (содержание поздней (ПД) и ранней (РД) древесины в годичном кольце, ширина годичного кольца (ШГК)).

Материалы и методы

В ходе проведения полевых исследований (работы проведены в 2022 г.) подобрано два осушаемых опытных лесных объекта, расположенных в

Сокольском районе Вологодской области. На первом – в зимний период 2005 года проведён первый приём несплошной заготовки древесины комплексным методом: удалялись сухостойные, фаутные и деревья старого поколения (перестойные). Второй приём удаления древостоя планируется по истечению срока в два класса возраста. Трелёвочные технологические коридоры соединяются с магистральными под углом в 45° – ВПП 13–16, 17–20, 38 и 39; ширина пасеки – 30 м; интенсивность заготовки – 40 % по запасу (рис. 1). Валка деревьев с одновременной раскряжёвкой хлыстов на сортименты проводилась бригадой вальщиков, трелёвка на погрузочный пункт – колёсным трактором с челюстным захватом, вывозка с погрузочного пункта – автопоездом с системой погрузки «Фискарс».

Тип торфяной залежи на всех объектах исследования – мезотрофный. Мощность торфяного слоя почвы на объекте лесозаготовки, расположенного между волоками, – 30 см, на ВПП 38 и 39 – в среднем 70 см. В контрольном древостое без заготовки древесины толщина торфяного слоя достигает 100 см. Осушительные каналы находятся в удовлетворительном рабочем состоянии. Осушение лесов в области проводилось до 1973 году открытыми самоотечными каналами. Лесозаготовка проведена с участием сотрудников Вологодской региональной лаборатории «СевНИИЛХ» под руководством Н.А. Дружинина [2].

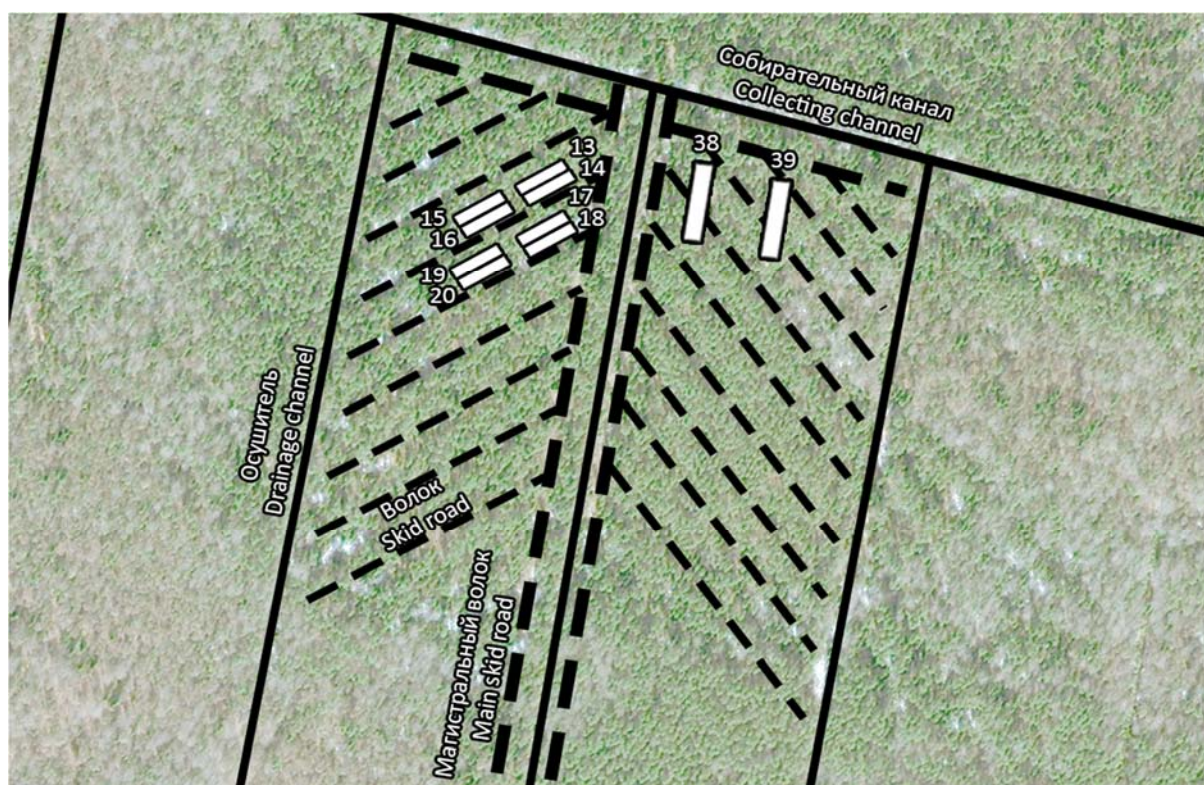


Рисунок 1. Схема расположения временных пробных площадей после проведения несплошной заготовки древесины в Сокольском районе Вологодской области (расстояние между осушительными каналами (в том числе для другого объекта) – 140 м).

Figure 1. Location scheme of temporary trial plots after partial cut in the Sokolsky district of the Vologda region

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

До проведения гидролесомелиорации объекты исследования относились к осоково-сфагновой

группе типов леса. После осушения и трансформации лесорастительных условий, в зависимости от

мощности и типа торфяной залежи, сформировались два типа леса.

В подлеске отмечены рябина и малина. В напочвенном покрове превалирует черника, встречаются папоротник, кислица и зелёный мох. В качестве контроля (для установления влияния на таксационные параметры деревьев *P. sylvestris* L. выборочной лесозаготовки) изучался осушаемый сосняк без проведенной в них заготовки древесины ВПП 21 и 22 (рис. 2).

ВПП ленточного типа отграничивались длинной стороной вдоль осушительного канала и трелёвочного волока с шириной 10 м.

Для исследования макроструктуры древесины на каждом объекте были отобраны и изучены керны доминантной породы в общем количестве 121 штук при минимальном количестве в 6 кернов на пробной площади. Образцы древесины выбурива-

лись на высоте в 0,6 м от шейки корня дерева возрастным буравом «Haglof». Для макроструктурных исследований керны зачищались лезвием, покрывались тонким слоем мела для более чёткого отображения годовичных колец и сканировались в высоком разрешении (1200 dpi). Точность измерения опытных поздних и ранних трахеид – 0,05 мм. Замеры проводились в программной среде Paint.net (вер. 5.0.3).

В контрольном объекте для проведения макроструктурных исследований обособлялся временной диапазон в связи с большой разницей в возрасте с остальными ВПП. Статистическая обработка опытных данных проводилась с помощью вариационного, корреляционного и регрессионного видов анализа во внутреннем специализированном пакете MS Excel (значимость по Стьюденту – 0,5, 0,1 и 0,01).



Рис. 2. Схема расположения контрольных временных пробных площадей в Сокольском районе Вологодской области.

Figure 2. Location scheme of control temporary trial plots in the Sokolsky district of the Vologda region

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Результаты

В сосняке после несплошной заготовки древесины, расположенного вдоль магистрального волока, наибольшие средние диаметры – 23,7 см (больше на 11 %, чем в сосняке между волоками лесозаготовки) (табл. 1). Средняя высота и запас по *P. sylvestris* L. в древостое после несплошной заготовки древесины в приканальном положении выше

на 21 и 41 %, соответственно, относительно центральной части осушаемого пространства. Сосновые древостои после несплошной лесозаготовки уступают по запасу контрольным соснякам (меньше на 52 %), что обусловлено удалением части деревьев. По этой же причине в сосняке без проведения заготовки густота выше (на 54 %). Средняя величина сухостоя деревьев *P. sylvestris* L. в древостоях после равномерного прореживания составила 3 %.

Таблица 1

Лесоводственно-таксационная характеристика осушаемых сосновых древостоев

Table 1

Silvicultural-taxation characteristics of drained pine stands

Номер ВПП Temporary plot number	Положение в осушаемой полосе* Position in the drained strip*	Состав древостоя Stand composition	Бонитер Growth class	Порода Species of wood	Средние Average			Сумма площадей сечений, м ² /га Stand basal area, m ² per hectare	Полнота Degree of closeness	Густота, экз./га Density, specimens per hectare	Запас, м ³ /га Growing stock, m ³ per hectare	
					Возраст, лет Forest age, years	Высота, м Tree height, m	Диаметр, см Tree diameter, cm				Растущего Damp growing	Сухого Dry
21	ПК, К CtC, C	10C ед. Б 10P single B	IV	С P	117 ± 5	20	22,5 ± 0,5	54,0	1,5	1360	507,3	-
			-	Б B	-	12	9,5 ± 1,3	0,4	<0,1	60	3,1	-
22	МК, К BC, C	10C ед. Б 10P single B	IV	С P	120 ± 6	21	23,7 ± 0,6	55,6	1,5	1260	530,4	-
			-	Б B	-	10	9,5 ± 0,7	0,4	<0,1	60	2,4	-
13-16	-	7C2E1B 7P2S1B	I	С P	70 ± 2	22	20,7 ± 0,9	13,4	0,4	400	138,9	12,1
			-	Е S	-	12	15,1 ± 0,8	6,8	0,3	380	44,1	-
			-	Б B	-	15	10,7 ± 0,8	1,8	0,1	200	12,9	-
17-20	-	9C1E+Б ед. Ос 9P1S+B single A	I	С P	72 ± 3	23	21,5 ± 0,9	26,8	0,7	740	305,9	4,98
			-	Е S	-	14	12,9 ± 0,8	3,7	0,1	280	30,2	-
			-	Б B	-	15	9,7 ± 0,5	1,9	0,1	260	16,8	-
			-	Ос A	-	14	12,0 ± 0,3	0,5	<0,1	40	3,28	-

38	ПК CtC	9C1E+B 9P1S+B	I	C P	74 ± 2	24	22,5 ± 0,8	32,6	0,9	820	343,9	7,7
			-	E S	-	11	13,7 ± 0,7	5,9	0,3	400	41,5	-
			-	B B	-	12	9,3 ± 0,3	1,5	0,1	220	7,7	-
39	МК BC	8C1B1E 8P1B1S	II	C P	70 ± 1	19	24,9 ± 0,9	22,4	0,6	460	202,4	6,4
			-	B B	-	14	12,6 ± 0,8	4,7	0,2	380	36,6	-
			-	E S	-	11	14,5 ± 1,4	4,7	0,2	280	26,4	-

Примечание: * – приканальное (ПК) и межканальное (МК) положения в осушаемом пространстве между двумя регулирующими каналами; К – контроль без заготовки древесины

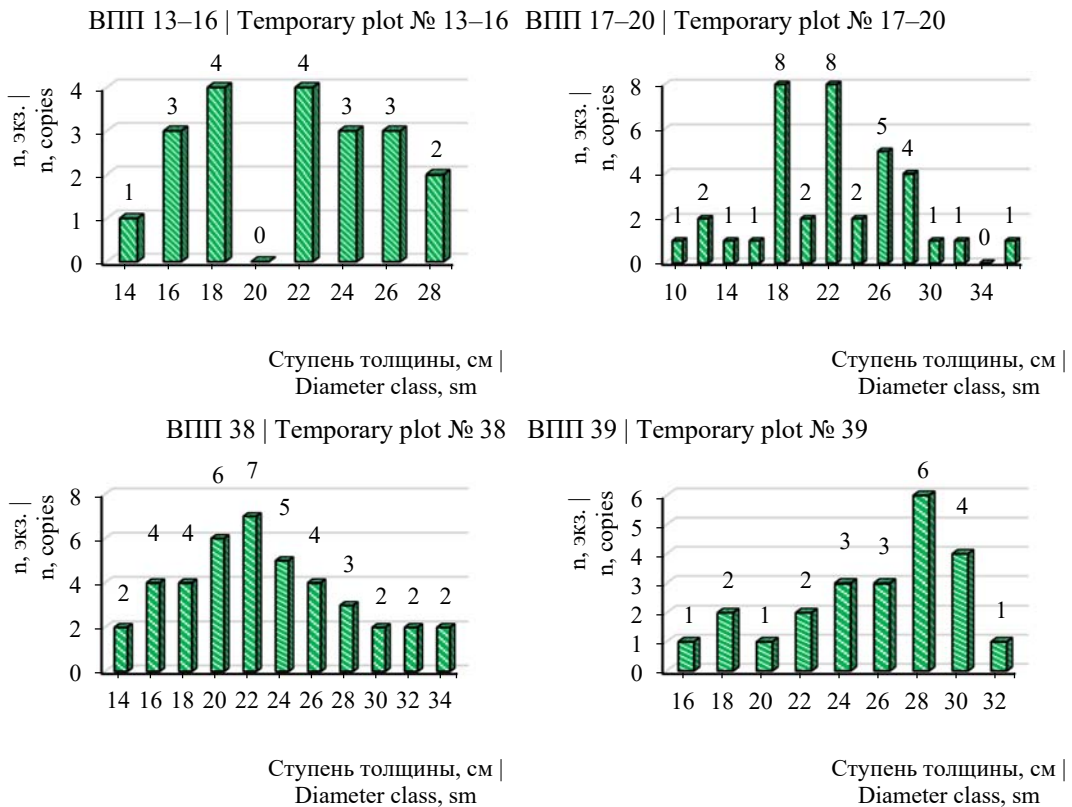
Note: * – Close (CtC) and between (BC) canals positions in drainage area among two regulating canals; C – control tree stands without logging

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Рассматривая древостои, расположенные между волоками, необходимо отметить выпадение отдельных ступеней толщины в результате лесозаготовки (рис. 3).

В сосняках, расположенных вдоль магистрального волока, в приканальном положении распределение числа деревьев по двухсантиметровым ступеням толщины стремится к нормальному. В центре осушаемого пространства преобладают деревья толстомерных ступеней толщины.



ВПП 21 | Temporary plot 21 ВПП 22 | Temporary plot № 22

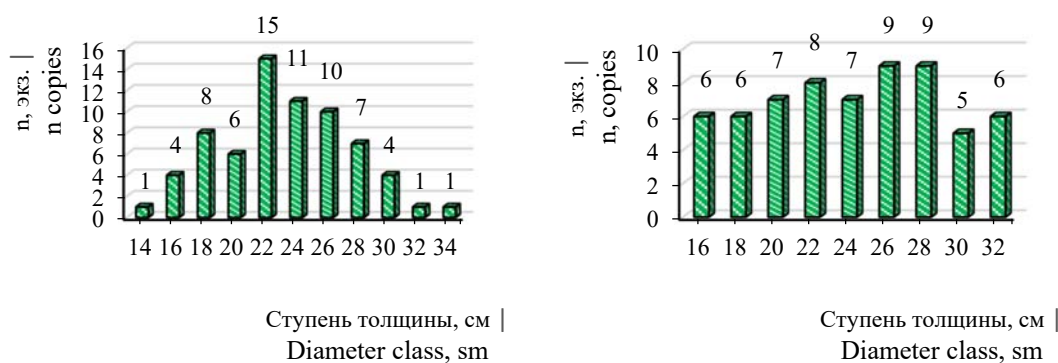


Рисунок 3. Распределение числа деревьев по ступеням толщины в исследуемых насаждениях
 Figure 3. Tree number distribution by diameter class in studied plantations

Источник: собственная композиция авторов
 Source: author's composition

Наибольшее увеличение сыро-растущего запаса по сосне обыкновенной (*P. sylvestris* L.) в древостоях после несплошной заготовки древесины в приканальном положении (табл. 2). В этом древостое распределение диаметров сосен наиболее близко к нормальному с превалированием средних ступеней толщины, в то время как в контрольном сосняке с идентичным положением относительно осушаемых каналов отмечено снижение деревьев со ступенью толщины в 20 см. В древостоях на ВПП 21

относительная полнота древостоя выше на 40 % относительно сосняка после заготовки деревьев в приканальном положении, при этом по приросту запаса уступают на 6 % сосняку после лесозаготовки, что может быть объяснено снижением приростов в высоковозрастных древостоях. Оба сравниваемых древостоя расположены вблизи осушительных каналов с примерно одинаковым слоем торфяной залежи.

Лесоводственная эффективность (изменение сыро-растущего запаса (в м³))
 несплошной заготовки древесины в искусственно-дренируемых лесах

Таблица 2

Table 2

Silvicultural efficiency (change in wet-growing stock (in m³))
 of partial cut in artificially drained forests

Номер ВПП, индекс типа леса Temporary plot number, forest type index	на 2018 год for 2018 year		на момент лесозаготовки at a point in timber cutting		изменение показателя за 14 лет change in indicator for over 14 years			среднегодовое изменение average annual change	
	на ВПП for temporary plot number	на 1 га for one hectare	на ВПП for temporary plot number	на 1 га for one hectare	на ВПП for temporary plot number	на 1 га for one hectare	в % in %	на ВПП for temporary plot number	на 1 га for one hectare
21, С. бр.-з.-м., ос. 21, green moss, vaccinium type pine stand, drained	16,2	324,4	11,5	229,9	4,7	94,5	29	0,4	7,3

22, С. бр.-з.-м., ос. 22, green moss, vaccinium type pine stand, drained	17,7	353,8	13,2	263,6	4,5	90,3	26	0,3	6,9
13–16, С. чер., ос. 13–16, myrtillus type pine stand, drained	5,7	114,4	3,8	75,4	1,9	38,9	34	0,1	3,0
17–20, С. чер., ос. 17–20, myrtillus type pine stand, drained	11,4	227,5	7,7	154,3	3,7	73,7	32	0,3	5,6
38, С. чер., ос. 38, myrtillus type pine stand, drained	13,1	262,4	8,1	161,5	5,0	100,9	38	0,4	7,8
39, С. чер., ос. 39, myrtillus type pine stand, drained	7,2	144,6	3,9	77,8	3,3	66,8	46	0,3	5,1

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

За период с 2005 по 2018 годы прирост запаса в контрольных древостоях без заготовки выше, в среднем, на 1,1 м³/ВПП, относительно сосняков после несплошной лесозаготовки. Это связано с большим исходным сыро-растущим запасом на контрольных объектах на момент лесозаготовки – 246,8 м³/га, который выше на 52 %, чем в древостоях после несплошной заготовки (117,3 м³/га). Увеличение показателя сыро-растущего запаса древостоя по сосне обыкновенной (*P. sylvestris* L.) за период в 14 лет после проведения несплошной заготовки древесины выше на 9 % в древостоях после заготовки древесины относительно контрольных объектов, следовательно несплошная заготовка древесины положительно влияет на увеличение сыро-растущего запаса древесины *P. sylvestris* L.

После проведения осушения среднепериодический прирост поздней древесины в приканальном положении увеличился на 30 % ($t_{\text{факт}} \geq t_{\text{ст}}$; 4,51 > 2,70), доказано на 99 % уровне значимости (табл. 3). Разница в изменении прироста годичного кольца *P. sylvestris* L. после осушения незначительна – <1 %. В межканальном положении приросты поздней древесины увеличились на 26 % ($t_{\text{факт}} \geq t_{\text{ст}}$; 4,51 > 2,70), доказано на 99 % уровне значимости, а ширина годичного кольца увеличилась на 4 %, что удалось доказать на 50 % уровне значимости ($t_{\text{факт}} \geq t_{\text{ст}}$; 0,75 > 0,68).

После проведения несплошной заготовки среднепериодический прирост древесины в приканальном положении увеличился на 19 % ($t_{\text{факт}} \geq t_{\text{ст}}$; 1,99 > 1,71), доказано на уровне значимости 90 %, в том числе прирост поздней древесины, который увеличился на 36 % ($t_{\text{факт}} \geq t_{\text{ст}}$; 3,16 > 2,78 на уровне значимости 99 %. В межканальном осушаемом пространстве увеличение радиального роста древесины после лесозаготовки достигает 9 % ($t_{\text{факт}} \geq t_{\text{ст}}$; 1,12 > 0,68, что доказано на 50 % уровне), приросты поздней древесины увеличились на 20 % ($t_{\text{факт}} \geq t_{\text{ст}}$; 1,97 > 1,69, что доказано на 90 % уровне).

В приканальном и межканальном положениях среднепериодический прирост годичного кольца *P. sylvestris* L. в древостоях после лесозаготовки выше на 51 % приростов в контрольных объектах без проведения лесозаготовки со схожими условиями расположения относительно канальной сети.

Сравнивая среднепериодические приросты древесины в сосняках после несплошной заготовки древесины относительно их расположения в осушаемом пространстве выявлено пятипроцентное увеличение ширины годичного кольца в приканальном положении относительно межканального пространства, что доказать статистически не удалось.

Среднепериодический прирост древесины *P. sylvestris* L. в миллиметрах
по периодам влияния лесоводственных мероприятий (параметры макроструктуры)

Table 3

P. sylvestris L. wood average periodic growth in millimeters
by period of silvicultural activity influence (macrostructure parameters)

Номер ВПП, параметры* Temporary plot number, parameters*	До осушения Before draining						Число годовичных колец в одном см, п. Number of annual rings in one centimeter, n
	ПД Late wood		РД Early wood		ШГК Annual ring width		
	М	± m _М	М	± m _М	М	± m _М	
13, ПК, ЦП CtC, CA	0,50	0,03	1,26	0,34	1,76	0,35	8,57
14, ПК, КП CtC, EA	0,34	0,02	1,06	0,07	1,39	0,08	6,60
15, МК, ЦП BC, CA	0,46	0,01	0,77	0,02	1,23	0,03	7,75
16, МК, КП BC, EA	0,30	0,01	0,93	0,02	1,23	0,03	8,00
17, ПК, ЦП CtC, CA	0,30	0,02	0,88	0,04	1,17	0,05	7,78
18, ПК, КП CtC, EA	0,31	0,02	0,92	0,05	1,22	0,05	8,11
19, МК, ЦП BC, CA	0,33	0,02	0,87	0,04	1,20	0,04	9,80
20, МК, КП BC, EA	0,37	0,03	1,14	0,09	1,51	0,11	6,88
21, ПК; К CtC, C	0,19	0,01	0,47	0,02	0,67	0,02	18,23
22, МК; К BC, C	0,22	0,01	0,56	0,02	0,78	0,02	15,67
38, ПК; ЗАГ CtC, partial cut	0,31	0,01	0,71	0,02	1,02	0,03	13,00
39, МК; ЗАГ BC, partial cut	0,48	0,02	0,71	0,03	1,19	0,04	10,33
Номер ВПП, параметры* Temporary plot number, parameters*	После осушения до лесозаготовки After draining before timber cutting						Число годовичных колец в одном см, п. Number of annual rings in one centimeter, n
	ПД Late wood		РД Early wood		ШГК Annual ring width		
	М	± m _М	М	± m _М	М	± m _М	
13, ПК, ЦП CtC, CA	0,62	0,04	0,69	0,04	1,31	0,06	8,78
14, ПК, КП CtC, EA	0,46	0,02	0,76	0,02	1,22	0,03	7,80
15, МК, ЦП BC, CA	0,72	0,03	0,76	0,02	1,48	0,04	7,60
16, МК, КП BC, EA	0,42	0,02	0,86	0,02	1,27	0,03	9,22
17, ПК, ЦП CtC, CA	0,36	0,02	0,75	0,03	1,11	0,05	9,11
18, ПК, КП CtC, EA	0,55	0,03	0,92	0,03	1,46	0,05	7,11
19, МК, ЦП BC, CA	0,45	0,02	0,71	0,02	1,15	0,04	9,20
20, МК, КП BC, EA	0,49	0,03	1,01	0,06	1,51	0,07	6,67
21, ПК; К CtC, C	0,31	0,01	0,53	0,02	0,84	0,03	10,67
22, МК; К BC, C	0,27	0,01	0,52	0,01	0,79	0,02	12,08
38, ПК; ЗАГ CtC, partial cut	0,51	0,02	0,92	0,02	1,43	0,04	4,00
39, МК; ЗАГ BC, partial cut	0,54	0,03	0,67	0,03	1,21	0,06	10,83
Номер ВПП, параметры* Temporary plot number, parameters*	После лесозаготовки After timber cutting						Число годовичных колец в одном см, п. Number of annual rings in one centimeter, n
	ПД Late wood		РД Early wood		ШГК Annual ring width		
	М	± m _М	М	± m _М	М	± m _М	

Номер ВПП, параметры* Temporary plot number, parameters*	До осушения Before draining						Число годовых колец в одном см, n. Number of annual rings in one centimeter, n
	ПД Late wood		РД Early wood		ШГК Annual ring width		
	М	± мм	М	± мм	М	± мм	
13, ПК, ЦП CtC, CA	1,17	0,16	0,81	0,11	1,98	0,24	6,78
14, ПК, КП CtC, EA	0,68	0,05	0,80	0,05	1,48	0,09	7,40
15, МК, ЦП BC, CA	0,76	0,08	0,56	0,03	1,32	0,10	9,11
16, МК, КП BC, EA	0,42	0,03	0,62	0,03	1,04	0,05	8,56
17, ПК, ЦП CtC, CA	0,65	0,07	0,75	0,06	1,40	0,12	9,75
18, ПК, КП CtC, EA	0,62	0,06	0,77	0,05	1,40	0,10	8,75
19, МК, ЦП BC, CA	0,64	0,04	0,81	0,04	1,45	0,07	8,10
20, МК, КП BC, EA	0,79	0,10	1,31	0,12	2,11	0,20	5,78
21, ПК; К CtC, C	0,31	0,02	0,45	0,02	0,77	0,04	10,57
22, МК; К BC, C	0,33	0,02	0,40	0,02	0,73	0,04	10,33
38, ПК; ЗАГ CtC, partial cut	0,73	0,05	1,02	0,03	1,75	0,06	6,00
39, МК; ЗАГ BC, partial cut	0,92	0,06	1,00	0,04	1,92	0,09	5,83

Примечание: положение в пасеке древостоя, оставленного на доразрешение (ЦП – центр, КП – край пасеки)

Note: * – position in the apiary of the forest stand left for growing (CA – center of the apiary, EA – edge of the apiary)

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Рассматривая радиальный рост древесины при разном расположениях сосен в пасеках заготовки древесины отмечено, что наибольшие среднепериодические приросты в древостоях, расположенных в приканальном положении центральной части пасеки заготовки древесины – 1,69 мм, что выше на 15 % приростов в древостоях с идентичным расположением в канальной сети на краю пасеки ($t_{\text{факт}} \geq t_{\text{ст}}$; $1,23 > 0,70$, что доказано на 50 % уровне).

После гидротехнической мелиорации число годовых колец в одном сантиметре у древостоев на ВПП 13–20, 38 и 39 снизилось на 7 %, в то время как в контрольных древостоях на 33 %. После проведения несплошной заготовки древесины число годовых колец в одном сантиметре в сосняках после лесозаготовки снизилось на 5 %, в контрольных древостоях без удаления части древостоя число годовых колец в одном сантиметре снизилось на 8 %.

После проведения лесосушительной гидротехнической мелиорации среднепериодический радиальный прирост увеличился в древостоях, расположенных между волоками лесозаготовки, на 0,24 мм/год (на 8 %), в опытных сосняках, отграниченных вдоль магистрального волока, на 0,60 мм/год (на 24 %) и в контрольном объекте на 0,04 мм/год (на 2 %) (табл. 4). Среднепериодический прирост поздней древесины вследствие осушения увеличился в древостоях после несплошной заготовки древесины на 0,27 мм/год (27 %), в контрольных сосняках на 0,16 мм/год, что эквивалентно 26 %. Процентное содержание поздней древесины после проведения лесосушительной мелиорации на всех опытных объектах равномерно увеличилось (от 4 до 9 %), что положительно отражается на макроструктурных особенностях древесины в промышленном отношении.

Влияние мелиорации на радиальный прирост древесины (в числителе – совокупный прирост, в знаменателе – среднепериодический прирост, в мм)

Reclamation influence of the radial wood growth (in the numerator – cumulative growth, in the denominator – average periodic increase, in millimeters)

Номер ВПП, параметры Tem- porary plot number, parameters,	Возрастной диапазон* Age range*	Период до мелиорации Period before reclamation			Период после мелиорации Period after reclamation		
		по радиусу along the radius	поздней древесины late wood	% поздней древесины % of late wood	по радиусу along the radius	поздней древесины late wood	% поздней древесины % of late wood
22, МК; К 22, ВС; С	46	79,0 1,72	21,8 0,47	28	72,0 1,57	26,8 0,58	37
21, ПК; К 21, СтС; С	37	56,0 1,51	16,2 0,44	29	64,3 1,74	24,0 0,65	37
16, МК, КП 16, ВС, ЕА	24	59,9 2,50	15,0 0,63	25	63,3 2,64	21,0 0,88	33
39, МК; ЗАГ 39, ВС; partial cut	22	44,3 2,01	19,1 0,87	43	49,6 2,25	22,2 1,01	45
38, ПК; ЗАГ 38, СтС; partial cut	22	40,4 1,84	12,7 0,58	31	61,6 2,80	21,4 0,97	35
20, МК, КП 20, ВС, ЕА	20	64,1 3,21	16,7 0,84	26	63,3 3,17	21,8 1,09	34
19, МК, ЦП 19, ВС, СА	20	44,8 2,24	12,4 0,62	28	48,6 2,43	19,0 0,95	39
15, МК, ЦП 15, ВС, СА	20	47,6 2,38	17,8 0,89	37	57,7 2,89	27,1 1,36	47
17, ПК, ЦП 17, СтС, СА	18	46,6 2,59	12,9 0,72	28	53,6 2,98	16,8 0,93	31
14, ПК, КП 14, СтС, ЕА	18	48,9 2,72	13,5 0,75	28	54,0 3,00	18,3 1,02	34
18, ПК, КП 18, СтС, ЕА	15	37,9 2,53	10,2 0,68	27	43,4 2,89	14,1 0,94	32
13, ПК, ЦП 13, СтС, СА	13	32,9 2,53	10,4 0,80	32	33,6 2,58	13,3 1,02	40

Примечание: * – количество лет до мелиорации и аналогичный период лет после её проведения

Note: * – the number of years before reclamation and the same period of years after it

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Обсуждение

Среднепериодический радиальный прирост древесины *P. sylvestris* L. выше в приканальном положении на 7 % (или 0,17 мм/год) относительно центральной части осушаемого пространства. Среднепериодический прирост поздней древесины по радиусу и содержание поздней древесины в годичном

кольце (в %) выше в межканальном положении на 6 и 3 %, соответственно.

В древостоях, после проведённой несплошной заготовки древесины суммарный радиальный прирост древесины увеличился в среднем на 6,13 мм (12 %) (рис. 4).

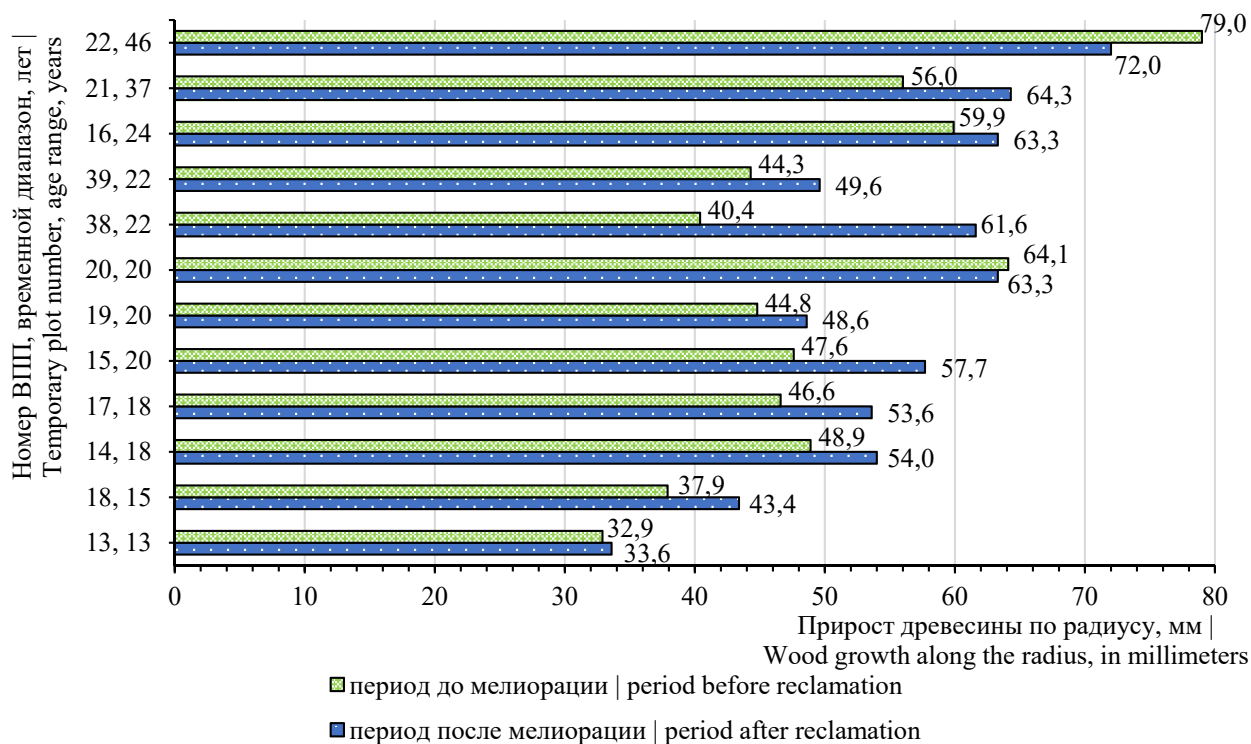


Рисунок 4. Суммарный радиальный прирост древесины *P. sylvestris* L. под влиянием осушения

Figure 4. The total radial growth in diameter of *P. sylvestris* L. wood under the drainage influence

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

В сосняках, расположенных в пасеке заготовки древесины, увеличение на 4,35 мм (8 %), в опытных древостоях, отграниченных вдоль магистрального волока на 13,25 мм (24 %). Наибольшая разница в суммарном значении радиального прироста (больше на 21,2 мм или 34 % после лесосушительной мелиорации) в сосняке, расположенном на ВПП 38. В приканальном положении суммарные радиальные приросты древостоев выше на 45 % (3,54 мм, в среднем) относительно сосняков, расположенных в центральной части осушаемого пространства.

Наибольшее значение среднего коэффициента автокорреляции приростов по объектам в сосняках после несплошной заготовки древесины, расположенных параллельно магистральному волоку, — 0,46 (табл. 5). Это может быть связано с наибольшими диаметрами деревьев на таком типе объекта — 23,7 см в среднем в приканальном и межканальном положениях (превышает значение диаметров на контрольных сосняках на 2,5 %). При таком расположении относительно волока в приканальном положении значение автокорреляции выше на 41 %, относительно центральной части осушаемого пространства.

Автокорреляция радиальных приростов в изучаемых сосняках

Table 5

Radial growths autocorrelation in the studied pine forests

Номер ВПП, параметры Temporary plot number, parameters	Коэффициент автокорреляции Autocorrelation co- efficient	Номер ВПП, параметры Temporary plot number, parameters	Коэффициент автокорреляции Autocorrelation co- efficient
13, ПК, ЦП 13, CtC, CA	0,27	19, МК, ЦП 19, BC, CA	0,26
14, ПК, КП 14, CtC, EA	0,23	20, МК, КП 20, BC, EA	0,25
15, МК, ЦП 15, BC, CA	0,05	21, ПК, К 21, CtC; C	0,21
16, МК, КП 16, BC, EA	0,17	22, МК, К 22, BC; C	0,24
17, ПК, ЦП 17, CtC, CA	0,14	38, ПК, ЗАГ 38, CtC; partial cut	0,58
18, ПК, КП 18, CtC, EA	0,26	39, МК, ЗАГ 39, BC; partial cut	0,34

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

На объектах после проведения несплошной заготовки древесины средний коэффициент автокорреляции радиальных приростов – 0,26, что на 12 % больше, чем в древостоях без проведения лесозаготовки. С краю пасеки коэффициент автокорреляции приростов выше на 21 % (0,21), чем в центральной части пасеки (0,18), что свидетельствует о более благоприятных условиях роста.

На всех ВПП установлена отрицательная зависимость совокупных радиальных приростов древесины *P. sylvestris* L. от числа лет (в годах) проведения лесозаготовки за исключением ВПП 18 со слабой (<0,30) теснотой связи (табл. 6). Наибольший отрицательная теснота связи ШГК от давности изъятия древесины в сосняках после несплошной лесозаготовки, расположенных между волоками (-0,81), что можно оценить как «высокая» при среднем отрицательном значении достоверности -20,31. При таком расположении ВПП коэффициент корреляции

выше на 10 % относительно древостоев без изъятия древесины за идентичный временной промежуток. Разница тесноты связи показателей ПД и ШГК от количества лет после заготовки составляет менее одного процента.

Подобраны линейные уравнения при отрицательной зависимости данных ширины поздней древесины и годичного кольца от количества лет после проведения лесозаготовки на осушаемых лесных объектах (рис. 5). Приведённые регрессии могут быть применимы с вероятностью верного заключения в 50 % для зависимости совокупного прироста поздней древесины от числа лет после проведения заготовки древесины, используя анализ по критерию Фишера: $F_{расч} (1,55) > F_{табл} (1,00)$ и в 99 % для зависимости совокупного прироста годичного кольца от числа лет после лесозаготовки $F_{расч} (24,42) > F_{табл} (3,91)$.

Таблица 6

Уровни связи совокупных радиальных приростов древесины *P. sylvestris* L. с количеством лет, прошедшим после лесозаготовки

Table 6

Connection levels of *P. sylvestris* L. wood cumulative radial increments with the number of years that have passed since timber harvesting

Номер ВПП Temporary plot number	ПД late wood		ШГК annual ring width		Номер ВПП Temporary plot number	ПД late wood		ШГК annual ring width	
	r	t	r	t		r	t	r	t
13	-0,74	-5,99	-0,79	-7,43	19	-0,89	-15,84	-0,94	-28,27

14	-0,92	-21,32	-0,97	-60,91	20	-0,84	-10,25	-0,84	-10,02
15	-0,86	-12,28	-0,87	-13,40	21	-0,75	-6,22	-0,88	-14,32
16	-0,52	-2,56	-0,23	-0,89	22	-0,72	-5,37	-0,58	-3,19
17	-0,87	-12,90	-0,93	-23,34	38	-0,76	-6,39	-0,84	-10,45
18	-0,86	-12,20	-0,91	-18,25	39	0,06	0,23	0,08	0,29

Примечание: жирным выделены наибольшие коэффициенты отрицательной корреляции, к которым были подобраны регрессии

Note: the largest negative correlation coefficients are highlighted in bold, to which the regressions were fitted

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

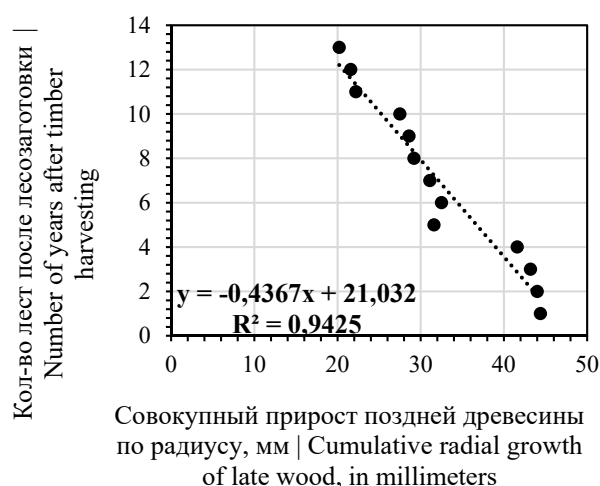
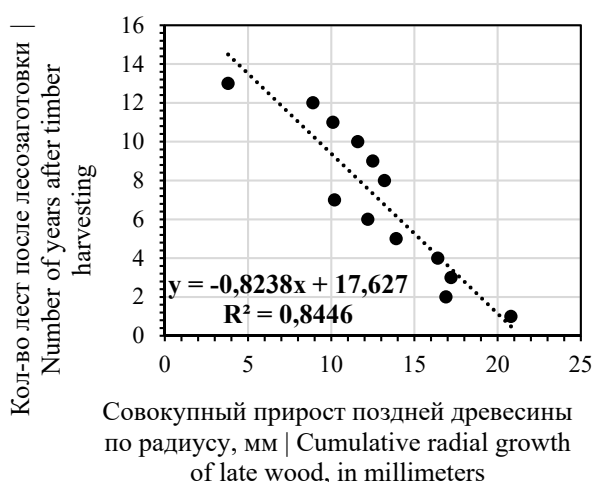


Рисунок 5. Формулы зависимостей ширины поздней древесины (А) и годового кольца (Б) от количества лет после лесозаготовки (ВПП 14)

Figure 5. Formulas for the late wood width (A) and annual ring (B)

dependence of the number of years after timber harvesting (Temporary plot number 14)

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Представлены полученные уравнения зависимостей линейного типа поздней древесины и годового кольца от числа лет после проведения лесозаготовки с высокими коэффициентами аппроксимации (табл. 7). Практически все уравнения, при таком значении коэффициента аппроксимации, подобраны

для сосняков, отграниченных между волоками лесозаготовки, за исключением ВПП 21. При таком расположении древостоев удалось подобрать уравнения для 63 % ВПП. В частности, получилось подобрать уравнения ШГК от числа лет после лесозаготовки с коэффициентом аппроксимации $\geq 0,9$ на ВПП 14, 17 и 19, приближающиеся к 100 %.

Таблица 7 – Линейные зависимости поздней древесины и совокупного прироста по радиусу от количества лет, прошедших после заготовки древесины

Номер ВПП Temporary plot number	ПД Late wood		ШГК Annual ring width	
	уравнение equation	R ²	уравнение equation	R ²
14	$y = -0,8238x + 17,627$	0,845	$y = -0,4367x + 21,032$	0,943
15	$y = -0,6632x + 15,535$	0,746	$y = -0,546x + 19,616$	0,765

17	$y = -1,0048x + 16,468$	0,757	$y = -0,7232x + 21,405$	0,857
18	$y = -0,7557x + 14,301$	0,745	$y = -0,4703x + 17,831$	0,821
19	$y = -0,6749x + 15,195$	0,797	$y = -0,474x + 20,631$	0,880
21	-	-	$y = -0,9253x + 25,017$	0,778

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Наибольшее значение ширины годичного кольца древесины в сосняке на ВПП 20 (табл. 8). Различие в среднепериодическом приросте древесины за все временные периоды в древостоях после между центром и краем пасеки незначительно и составляет <5 %. Максимальный показатель ширины годичного кольца в древостоях, расположенных в центре пасеки в период до проведения мелиорации, что выше на 39 % этого значения в сосняке на краю пасеки заготовки древесины, следует учесть больший показатель основной ошибки, превосходящей на 44 % в центре пасеки, относительно значения на краю.

Несплошная заготовка древесины положительно повлияла на радиальный рост древесины *P. sylvestris* L., которая подтверждается увеличением ширины годичного кольца на 22 %. В древостоях без заготовки древесины за идентичный временной промежуток среднепериодический прирост снизился в среднем на 8 %. Рассматривая положение деревьев в осушаемой полосе, в межканальном положении приросты больше на 6 %, чем в древостоях вблизи канала.

В среднем, с 1972 по 2004 года ширина годичного кольца всех опытных деревьев увеличилась на 13 % в приканальном и на один процент в центре осушаемого пространства. Точность опыта высокая ($p < 0,05$) в 83 % случаях, в остальных удовлетворительная ($p > 0,05$), результаты исследования достоверны ($t_m = 25,3$).

Выводы

1. Распределение числа деревьев по ступеням толщины стремится к «нормальному» у деревьев, растущих в приканальном пространстве после проведения несплошной заготовки древесины. В контрольном древостое распределение по ступеням толщины почти равномерное.

2. В результате проведения гидротехнической мелиорации в Сокольском районе Вологодской области ширина годичного кольца у деревьев на высоте 1,3 м на всех объектах увеличилась в среднем на 3 %. Влияние несплошной рубки древесины оказало больший положительный эффект (увеличение на 0,27 мм/год) на среднепериодический прирост годичного кольца, что больше на 17 %, относительно приростов древесины *P. sylvestris* L. во временной период до проведения несплошной заготовки древесины. Среднепериодические приросты выше в сосновом насаждении после проведения выборочной рубки среди деревьев *P. sylvestris* L., произрастающей на краю пасеки лесозаготовки (в среднем на 8 % или 0,10 мм/год), относительно опытных древостоев в центральной части пасеки.

3. За временной период с 2005 по 2018 годы сыро-растущий запас в древостоях пройденных несплошной рубкой увеличился на 38 %, в то время как на контрольных объектах без рубки на 28 %, что отражает улучшение условий роста деревьев *P. sylvestris* L. после несплошной заготовки древесины.

4. Среднепериодический радиальный прирост древесины *P. sylvestris* L. по толщине на всех объектах исследования выше во временной отрезок после проведения гидротехнической мелиорации на 2,58 мм (на 10 %), чем в этих же сосновых древостоях до проведения лесосушения. В древостоях после проведения несплошной заготовки древесины установлена отрицательная связь приростов годичного кольца и поздней древесины с количеством лет, прошедшим после рубки леса – 0,72, установлено, что теснота связи ширины годичного кольца и поздней древесины снижается с увеличивающимся числом лет после равномерного разреживания древостоя.

Список литературы

1. Даниленко, О.К. К вопросу повышения эффективности проведения рубок ухода / О.К. Даниленко, А.Н. Сухих // Системы. Методы. Технологии. – 2019. – № 3(43). – С. 105–110. – DOI 10.18324/2077-5415-2019-3-105-110. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/sitzap>.
2. Новоселов, А. С. Водно-болотные угодья Сокольского района Вологодской области / А. С. Новоселов, В. П. Уханов. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2020. – 167 с. – ISBN 978-5-87851-912-0. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/DEFBGF>.
3. Дунаев, А.И. Оценка глубины дренажа на осушаемых торфяниках с/х назначения / А.И. Дунаев // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. – 2019. – № 5(75). – С. 74–77. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41161800>.
4. Желдак, В.И. Природно-целевые объекты лесоводства - основа разработки и применения эффективных лесоводственных мероприятий в лесах различного целевого назначения / В.И. Желдак // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2019. – Т. 23, № 2. – С. 35–44. – DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2019-2-35-44>. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/zdvcaff>.
5. Залесов, С.В. Санитарное состояние осушаемых сосняков Среднего Урала / С.В. Залесов, А.В. Тукачева // Лесохозяйственная информация. – 2018. – № 2. – С. 75–84. – DOI: <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2018.2.08>. Режим доступа: <https://elibrary.ru/xqfwjn>.
6. Зарубина, Л.В. Оценка возобновительных процессов под пологом приспевающих хвойных древостоев в Вологодской области / Л.В. Зарубина, А.А. Карбасников, Д.А. Пешин // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2021. – Т. 25, № 2. – С. 10–18. – DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-2-10-18>. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/niesaw>.
7. Ильинцев, А.С. Современная динамика лесопользования в бореальных лесах России (на примере Архангельской области) / А.С. Ильинцев, И.Г. Шамонтьев, С.В. Третьяков // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11, № 3(43). – С. 45–62. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.3/4>. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/umfago>.
8. Комплексная оценка качества древесины сосны в лесных культурах разных условий местопроизрастания / В.И. Мелехов, Н.А. Бабич, С.А. Корчагов, Р.В. Щекалев // Лесоведение. – 2021. – № 2. – С. 208–216. – DOI: <https://doi.org/10.31857/S0024114821020054>. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/nlnmdj>.
9. Малышева, Н.В. Геоинформационная поддержка оценки бюджета углерода лесных экосистем / Н.В. Малышева, Т.А. Золина // Лесохозяйственная информация. – 2020. – № 1. – С. 48–56. – DOI: <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2020.1.05>. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/dpsmls>.
10. Особенности и лесоводственная эффективность проходных рубок в осушаемых лесах / Н.А. Дружинин, Ф.Н. Дружинин, О.А. Васильева [и др.] // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2023. – № 242. – С. 28–42. – DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2023.242.28-42>. Режим доступа: <https://elibrary.ru/qsutrd>.
11. Оценка культур сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях Республики Татарстан / С.Г. Глушко, И.Р. Галиуллин, Н.Б. Прохоренко, Ш.Ш. Шайхразиев // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2020. – Т. 24, № 6. – С. 26–33. – DOI 10.18698/2542-1468-2020-6-26-33. Режим доступа: <https://elibrary.ru/msvzzb>.
12. Пахучий, В.В. Критерии и индикаторы устойчивого управления лесами в условиях осушаемых лесных земель / В.В. Пахучий, Л.М. Пахучая // Актуальные проблемы лесного комплекса. – Брянск, 2020. – Вып. 58. – С. 39–42. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44172893>.
13. Пахучий, В.В. Динамика таксационных показателей сосновых древостоев на объектах гидромелиорации в Республике Коми / В.В. Пахучий, Л.М. Пахучая, Д.В. Губер // Актуальные проблемы лесного комплекса. – Брянск, 2019. – Вып. 54. – С. 39–42. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38196169>.
14. Оценка взаимосвязей между таксационными показателями насаждений в северных районах Республики Коми / В.В. Пахучий, В.Н. Рочев, И.Н. Плетнев, В.Ю. Рубанова // Актуальные проблемы лесного комплекса. – Брянск, 2019. – Вып. 54. – С. 45–51. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38196171>.

15. Повышение эффективности лесопользования на основе оптимизации несплошных рубок растущих насаждений / С.М. Базаров, Ю.И. Беленький, И.В. Бачериков [и др.] // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2019. – № 226. – С. 55–65. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/wkvyuf>.
16. Рябухин, П.Б. Лесозаготовки и экология лесной среды / П.Б. Рябухин // Системы. Методы. Технологии. – 2019. – № 3(43). – С. 96–99. – DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2019-3-96-99>.
17. Особенности ведения лесного хозяйства на осушаемых землях / А.М. Тараканов, А.А. Симаков, В.В. Капистка, А.В. Дворяшин // Наука – лесному хозяйству Севера: сб. науч. трудов ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства» / Отв. ред.: Н.А. Демидова. – Архангельск: ФБУ «СевНИИЛХ», 2019. – С. 9–18. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37032838>.
18. Тюкавина, О.Н. Плотность древесины сосны в осушаемых сосняках кустарничково-сфагновых // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2020. – Вып. 2(374). – С. 73–80. – <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-2-73-80>.
19. Уляшева, Л. Г. Проблемы лесозаготовок и методологии их учета / Л. Г. Уляшева // Бухгалтерский учет. – 2020. – № 5. – С. 119–123. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42780733>.
20. Hökkä H., Laurén A., Stenberg L., Launiainen S., Leppä K., Nieminen M. Defining guidelines for ditch depth in drained Scots pine dominated peatland forests // *Silva Fennica*. 2021; 55 (3): 10494. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.10494>.
21. Kēniņa, L., Zute, D., Jaunslaviete, I. et al. Old-Growth Coniferous Stands on Fertile Drained Organic Soil: First Results of Tree Biomass and Deadwood Carbon Stocks in Hemiboreal Latvia // *Forests*. 2022; 13(2): 279. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13020279>.
22. Repola J., Hökkä H., Salminen H. Models for diameter and height growth of Scots pine, Norway spruce and pubescent birch in drained peatland sites in Finland // *Silva Fennica*. 2018; 52 (5): 10055. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.10055>.
23. Skaggs R.W., Amatya D.M., Chescheir G.M. Effects of Drainage for Silviculture on Wetland Hydrology // *Wetlands*. 2021; 40: 47–64. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13157-019-01202-6>.

References

1. Danilenko O.K., Sukhikh A.N. *K voprosu povysheniya effektivnosti provedeniya rubok ukhoda* [To the question of improving the efficiency of thinning operations]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2019, no. 3(43), pp. 105–110. (In Russian). DOI 10.18324/2077-5415-2019-3-105-110.
2. Druzhinin N.A., Druzhinin F.N. *Vozobnovlenie lesa i vozrastnoe stroenie drevostoev na torfyanykh pochvakh* [Renewal of the forest and the age structure of forest stands on peat soils]. Monography; Vologda: Polygraph-Periodicals, 2021, 118 p. (In Russian). ISBN 978-5-91965-266-3.
3. Dunaev A.I. *Otsenka glubiny drenazha na osushaemykh torfyanikakh s/kh naznacheniya* [Estimation of drainage depth on drained peat bogs for agricultural purposes]. *Vestnik Bryanskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Bulletin of the Bryansk State Agricultural Academy], 2019, no. 5(75), pp. 74–77. (In Russian). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41161800>.
4. Zheldak V.I. *Prirodno-tselevye ob"ekty lesovodstva - osnova razrabotki i primeneniya effektivnykh lesovodstvennykh meropriyatiy v lesakh razlichnogo tselevogo naznacheniya* [Natural target objects of forestry - the basis for the development and application of effective forestry measures in forests for various purposes]. *Lesnoy vest-nik. Forestry Bulletin*. [Forest gazette. Forestry Bulletin], 2019, no. 23 (2), pp. 35–44. (In Russian). DOI 10.18698/2542-1468-2019-2-35-44.
5. Zalesov S.V., Tukacheva A.V. *Sanitarnoe sostoyanie osushaemykh sosnyakov Srednego Urala* [Sanitary state of drained pine forests of the Middle Urals]. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 2018, no. 2, pp. 75–84. (In Russian). DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2018.2.08.
6. Zarubina L.V., Karbasnikov A.A., Pershin D.A. *Otsenka vozobnovitel'nykh protsessov pod pologom prispevayushchikh khvoynnykh drevo-stoev v Vologodskoy oblasti* [Assessment of renewal processes under the canopy of

ripening coniferous stands in the Vologda Oblast]. *Lesnoy vestnik. Forestry Bulletin*. [Forest gazette. Forestry Bulletin], 2021, no. 25 (2), pp. 10–18. (In Russian). DOI 10.18698/2542-1468-2021-2-10-18.

7. Il'intsev A.S., Shamont'ev I.G., Tret'yakov S.V. *Sovremennaya dinamika lesopol'zovaniya v boreal'nykh lesakh Rossii (na primere Arkhangel'skoy oblasti)* [Modern dynamics of forest management in the boreal forests of Russia (on the example of the Arkhangelsk region)]. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Lesotechnical journal], 2021, no. 3(43), pp. 45–62. (In Russian). DOI 10.34220/issn.2222-7962/2020.3/4.

8. Melekhov V.I., Babich N.A., Korchagov S.A., Shchekalev R.V. *Kompleksnaya otsenka kachestva drevesiny sosny v lesnykh kul'turakh raznykh usloviy mestoproiz-rastaniya* [Comprehensive assessment of the quality of pine wood in forest cultures of different habitat conditions]. *Lesovedenie* [Forest science], 2021, no. 2, pp. 208–216. (In Russian). DOI 10.31857/S0024114821020054.

9. Malysheva N.V., Zolina T.A. *Geoinformatsionnaya podderzhka otsenki byudzheta ugleroda lesnykh ekosistem* [Geoinformation support for assessing the carbon budget of forest ecosystems]. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry information], 2020, no. 1, pp. 48–56. (In Russian). DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2020.1.05.

10. Druzhinin N.A., Druzhinin F.N., Vasilyeva O.A., Koryakina D.M., Tsypilev S.V. *Osobennosti i lesovodstvennaya effektivnost' prokhodnykh rubok v osushaemykh lesakh* [Peculiarities and silvicultural efficiency of passing cuttings in drained forests]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Proceedings of the St. Petersburg Forestry Engineering Academy], 2023, no. 242, pp. 28–42. (In Russian). DOI 10.21266/2079-4304.2023.242.28-42.

11. Glushko S.G., Galiullin I.R., Prokhorenko N.B., Shaykhraziev S.S. *Otsenka kul'tur sosny obyknovennoy (Pinus sylvestris L.) v usloviyakh Respubliki Tatarstan* [Evaluation of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) crops under the conditions of the Republic of Tatarstan]. *Lesnoy vestnik. Forestry Bulletin*. [Forest gazette. Forestry Bulletin], 2020, no. 26 (6), pp. 26–33. (In Russian). DOI 10.18698/2542-1468-2020-6-26-33.

12. Pakhuchiy V.V., Pakhuchaya L.M. *Kriterii i indikatory ustoychivogo upravleniya lesami v usloviyakh osushaemykh lesnykh zemel'* [Criteria and indicators of sustainable forest management in the conditions of drained forest lands]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex], Bryansk, 2020, no. 58, pp. 39–42. (In Russian). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44172893>.

13. Pakhuchiy V.V., Pakhuchaya L.M., Guber D.V. *Dinamika taksatsionnykh pokazateley sosnovykh drevostoev na ob'ektakh gidrome-lioratsii v Respublike Komi* [Dynamics of taxation indicators of pine forest stands at hydro-reclamation facilities in the Komi Republic]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex], Bryansk, 2019, no. 54, pp. 39–42. (In Russian). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38196169>.

14. Pakhuchiy V.V., Rochev V.N., Pletnev I.N., Rubanova V.Y. *Otsenka vzaimosvyazey mezhdu taksatsionnymi pokazatelyami nasazhdeniy v severnykh rayonakh Respubliki Komi* [Evaluation of the relationship between taxation indicators of plantations in the northern regions of the Republic of Komi]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex], Bryansk, 2019, no. 54, pp. 45–51. (In Russian). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38196171>.

15. Bazarov S.M., Belenkiy Yu.I., Bacherikov I.V., Ilyushenko D.A., Bazarova M.V., Nguen Phuc Sue. *Povyshenie effektivnosti lesopol'zovaniya na osnove optimizatsii nesploshnykh rubok rastu-shchikh nasazhdeniy* [Improving the efficiency of forest management based on the optimization of non-continuous felling of growing plantations]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Proceedings of the St. Petersburg Forestry Engineering Academy], 2019, no. 226, pp. 55–65. (In Russian). DOI 10.21266/2079-4304.2019.226.55-65.

16. Ryabukhin P.B. *Lesozagotovki i ekologiya lesnoy sredy* [Logging and ecology of the forest environment]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2019, no. 3(43), pp. 96–99. (In Russian). DOI 10.18324/2077-5415-2019-3-96-99.

17. Tarakanov A.M., Simakov A.A., Kapistka V.V., Dvoryashin A.V. *Osobennosti vedeniya lesnogo khozyaystva na osushaemykh zemlyakh* [Features of forest management on drained lands]. *Nauka – lesnomu khozyaystvu Severa: sb. nauch. trudov FBU «Severnnyy nauchno-issledovatel'skiy institut lesnogo khozyaystva»* [Science to the Forestry of the North: collection of scientific paper FBU «Northern Research Institute of Forestry»], Editor: N.A. Demidova. Arkhangel'sk: FBU «SevNIILKh», 2019, pp. 9–18. (In Russian). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37032838>.

18. Tyukavina O.N. *Plotnost' drevesiny sosny v osushaemykh sosnyakakh kustarnichkovo-sfagnovykh* [Density of pine wood in drained dwarf-sphagnum pine forests]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal*. [Russian Forestry Journal], 2020, no. 2(374), pp. 73–80. (In Russian). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-2-73-80>.
19. Ulyasheva L.G. *Problemy lesozagotovok i metodologii ikh ucheta* [Problems of logging and the methodology of their accounting], *Bukhgalterskiy uchët* [Accounting], 2020, no. 5, pp. 119–123. (In Russian). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42780733>.
20. Hökkä H., Laurén A., Stenberg L., Launiainen S., Leppä K., Nieminen M. Defining guidelines for ditch depth in drained Scots pine dominated peatland forests // *Silva Fennica*. 2021; 55 (3): 10494. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.10494>.
21. Ķēniņa, L., Zute, D., Jaunslaviete, I. et al. Old-Growth Coniferous Stands on Fertile Drained Organic Soil: First Results of Tree Biomass and Deadwood Carbon Stocks in Hemiboreal Latvia // *Forests*. 2022; 13(2): 279. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13020279>.
22. Repola J., Hökkä H., Salminen H. Models for diameter and height growth of Scots pine, Norway spruce and pubescent birch in drained peatland sites in Finland // *Silva Fennica*. 2018; 52 (5): 10055. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.10055>.
23. Skaggs R.W., Amatya D.M., Chescheir G.M. Effects of Drainage for Silviculture on Wetland Hydrology // *Wetlands*. 2021; 40: 47–64. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13157-019-01202-6>.

Сведения об авторах

✉ *Попов Олег Сергеевич* – аспирант кафедры лесоводства и лесоустройства, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова», набережная Северной Двины, 17, г. Архангельск, Российская Федерация, 163002, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2464-1729>, e-mail: popovoleg81@gmail.com.

Третьяков Сергей Васильевич – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор кафедры лесоводства и лесоустройства, руководитель «Центра исследования лесов» высшей школы естественных наук и технологий, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова», набережная Северной Двины, 17, г. Архангельск, Российская Федерация, 163002, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5982-3114>, e-mail: s.v.tretyakov@narfu.ru.

Новосёлов Анатолий Сергеевич – кандидат с.-х. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», ул. Ленина, 15, г. Вологда, Российская Федерация, 160000, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6907-0424>, e-mail: AnSer-Rock-Bard@mail.ru.

Information about the authors

✉ *Oleg S. Popov* – Postgraduate student of the Department of forestry and forest management, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov”, embankment Northern Dvina, 17, Arkhangelsk city, Russian Federation, 163002, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2464-1729>, e-mail: popovoleg81@gmail.com.

Sergey V. Tretyakov - Doctor of Science in Agricultural Sciences, Professor, Professor of the Department of Forestry and Forest Inventory, Head of the Forest Research Center of the Higher School of Natural Sciences and Technologies, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov”, embankment Northern Dvina, 17, Arkhangelsk city, Russian Federation, 163002, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5982-3114>, e-mail: s.v.tretyakov@narfu.ru.

Anatoly S. Novoselov - Cand. Sci. (Agric.), Associate Professor, Vologda State University, Lenin str., 15, Vologda city, Russian Federation, 160000, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6907-0424>, e-mail: AnSer-Rock-Bard@mail.ru.

✉ – Для контактов/Corresponding author


Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/6>

УДК 630*31 : 169.113




Имитационное моделирование работы рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства автопоезда с функцией самовытаскивания


Вадим О. Никонов¹✉, 8888nike8888@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-7380-9180>

Валерий И. Посметьев¹, posmetyev@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>

Игорь В. Сизьмин¹, igorsizmin96@gmail.com  <https://orcid.org/0000-0002-9035-515X>

Виктор В. Посметьев¹, victorvpo@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-6622-5358>

Владимир А. Зеликов¹, zelikov-vrn@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-2317-9413>

Николай В. Мозговой², nv_moz@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-9835-1824>

Петр В. Колодий³, pkolody@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-6418-1531>

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Россия

²ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Российская Федерация

³Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины, ул. Мазурова, 59/34, г. Гомель, 246053, Республика Беларусь

Выявлены наиболее значимые факторы, от которых зависит изменение транспортных расходов, затрачиваемых лесозаготовительными предприятиями на процесс доставки лесоматериалов потребителям лесовозным автомобильным транспортом. Для сокращения таких расходов, предложена перспективная конструкция дышла сцепного устройства лесовозного автопоезда, обеспечивающая эффект самовытаскивания автопоезда, генерирование и накопление энергии рабочей жидкости, с последующим ее использованием в технологическом гидравлическом оборудовании. Для имитационного моделирования движения лесовозного автопоезда, оснащенного предлагаемым дышлом сцепного устройства и работы дышла отдельно в режимах самовытаскивания, рекуперации и демпфирования динамических нагрузок разработаны две компьютерные программы. Установлено, что с увеличением глубины неровностей затрудняется самовытаскивание лесовозного автопоезда, что приводит к ухудшению показателей эффективности процесса самовытаскивания. Однако при средней глубине неровностей опорной поверхности менее 0,3 м показатели эффективности процесса самовытаскивания составляют приемлемые величины: скорость самовытаскивания более 0,22 м/с, величина перемещения за цикл удлинения-сокращения дышла сцепного устройства менее 0,12 м, потребляемая пневмогидравлическим дышлом сцепного устройства мощность менее 1,9 кВт. При очень сложных дорожных условиях – средней глубине неровностей от 0,3 до 0,5 м – самовытаскивание лесовозного автопоезда происходит, но показатели эффективности снижаются: скорость самовытаскивания снижается до 0,16 м/с, перемещение увеличивается до 0,17 м, потребляемая мощность увеличивается до 3,1 кВт. Выявлено, что при изменении в широких пределах коэффициента вязкого трения колес лесовозного автопоезда об опорную поверхность лесовозной дороги, рекуперативное пневмогидравлическое дышло сцепного устройства обеспечивает достаточно эффективное самовытаскивание со скоростью самовытаскивания от 0,17 до 2,3 м/с, величиной перемещения (отката) от 0,09 до 0,16 м, потребляемой мощностью от 1,5 до 2,2 кВт.

Ключевые слова: лесовозный автопоезд, эффективность самовытаскивания, имитационное моделирование, глубина неровностей лесовозной дороги, транспортные издержки, потребляемая мощность, рекуперация энергии, коэффициент вязкого трения, дышло сцепного устройства

Финансирование: исследование проведено при поддержке локального гранта ФГБОУ ВО ВГЛТУ.

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Имитационное моделирование работы рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства автопоезда с функцией самовытаскивания / В. О. Никонов, В. И. Посметьев, И. В. Сизьмин, В. В. Посметьев, В. А. Зеликов, Н. В. Мозговой, П. В. Колодий // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 4 (52). – Ч. 1. – С. 92–113. – Библиогр.: с. 110–112 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/6>.

Поступила 21.09.2023. *Пересмотрена* 21.11.2023 *Принята* 21.11.2023. *Опубликована онлайн* 29.12.2023

Article

The simulation modeling of the operation of a recuperative pneumohydraulic drawbar of a road train coupling device with a self-pulling function

Vadim O. Nikonov¹✉, 8888nike8888@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-7380-9180>

Valerii I. Posmetev¹, posmetyev@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>

Igor V. Sizmin¹, igorsizmin96@gmail.com  <https://orcid.org/0000-0002-9035-515X>

Viktor V. Posmetev¹, victorvpo@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-6622-5358>

Vladimir A. Zelikov¹, zelikov-vrn@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-2317-9413>

Nikolay V. Mozgovoy², nv_moz@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-9835-1824>

Petr V. Kolodii², pkolody@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-6418-1531>

¹Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh city, 394087, Russian Federation

²Voronezh State Technical University, ul. 20-letiya Oktyabrya, 84, Voronezh, 394006, Russian Federation

³F. Skorina Gomel State University, st. Mazurova – 59/34, Gomel, 246053, Republic of Belarus

Abstract

Based on the conducted exploratory research, the most significant factors were identified on which the change in transport costs spent by logging enterprises on the process of delivering timber to consumers by logging trucks depends. To reduce such costs, a promising design of the drawbar of the coupling device of a timber road train has been proposed, providing the effect of self-pulling of the road train, generating and storing the energy of the working fluid, with its subsequent use in technological hydraulic equipment. To simulate the movement of a timber road train equipped with the proposed drawbar of the coupling device and the operation of the drawbar separately in the modes of self-pulling, recovery and damping of dynamic loads, two computer programs have been developed. It has been established that with an increase in the depth of irregularities, self-pulling of a timber road train becomes more difficult, which leads to a deterioration in the efficiency of the self-pulling process. However, with an average depth of unevenness of the supporting surface of less than 0.3 m, the efficiency indicators of the self-retracting process are acceptable values: the self-retracting speed is more than 0.22 m/s, the amount of displacement per extension-reduction cycle of the drawbar of the coupling device is less

than 0.12 m, consumed by the pneumohydraulic drawbar of the coupling device power less than 1.9 kW. Under very difficult road conditions – the average depth of irregularities is from 0.3 to 0.5 m – the self-pulling of the timber road train occurs, but the efficiency indicators decrease: the self-pulling speed decreases to 0.16 m/s, the movement increases to 0.17 m, power consumption increases to 3.1 kW. It was revealed that when the coefficient of viscous friction of the wheels of a logging road train against the supporting surface of a logging road changes over a wide range, the recuperative pneumohydraulic drawbar of the coupling device provides a fairly effective self-pulling with a self-pulling speed from 0.17 to 2.3 m/s, a displacement (rollback) value from 0.09 to 0.16 m, power consumption from 1.5 to 2.2 kW.

Keywords: *logging road train, self-pulling efficiency, simulation modeling, depth of logging road roughness, transportation costs, power consumption, energy recovery, viscous friction coefficient, drawbar*

Funding: the research supported by a local grant from the FSBEI HE VSUFT.

Acknowledgments: author(s) thank(s) the reviewers for their contribution to the peer review.

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

For citation: Nikonov V. O., Posmetev V. I., Sizmin I. V., Posmetev V. V., Zelikov V. A., Mozgovoi N. V., Kolodii P. V. (2023). The simulation modeling of the operation of a recuperative pneumohydraulic drawbar of a road train coupling device with a self-pulling function. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 4 (52), part 1, pp. 92-113 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/6>.

Received 21.09.2023 *Revised* 21.11.2023 *Accepted* 21.11.2023 *Published online* 29.12.2023

Введение

Природный потенциал и грамотное управление лесами в России дает возможность значительно увеличить объемы заготавливаемых и вывозимых лесоматериалов, а также обеспечить растущий спрос со стороны деревообрабатывающей промышленности. Процесс вывозки древесины автомобильным транспортом леса, являющийся важным, дорогостоящим и трудоемким звеном заготовки лесоматериалов, играет важную роль в доставке древесины из лесозаготовительных зон лесопильным, целлюлозным, деревообрабатывающим предприятиям, а также железнодорожным, складским и сортировочным терминалам. Транспортировка древесины, характеризующаяся большими лесными массивами и различной сосредоточенностью лесоперерабатывающих предприятий, составляет значительную долю от общих эксплуатационных расходов лесного хозяйства, и может изменяться от 25 до 45 %. На вывозку лесоматериалов к месту переработки затрачивается 20-30 % от общей стоимости заготавливаемой древесины. В местах с недостаточно развитой дорожной сетью стоимость вывозки лесоматериалов возрастает еще больше. Вы-

возка лесоматериалов после стадии погрузки составляет до 40 % от общих производственных затрат на лесопroduкцию. Лесоматериалы могут перевозиться по лесовозным дорогам различными лесовозными автомобилями с соответствующими техническими модификациями. Высокая эффективность вывозки лесоматериалов потребителям лесовозными автопоездами имеет решающее значение для обеспечения устойчивых выгод от заготовки древесины. Среди транспортных расходов, стоимость топлива составляет от 30 до 40 %. В этой связи, решение вопроса снижения транспортных издержек при вывозке лесоматериалов лесовозными автопоездами окажет существенное влияние на развитие лесного хозяйства [1].

На основании этого, поисковые исследования, направленные на выявление наиболее значимых факторов, от которых зависит изменение транспортных расходов, затрачиваемых лесозаготовительными предприятиями на процесс доставки лесоматериалов потребителям лесовозным автомобильным транспортом, являются актуальной задачей. Это подтверждается результатами опубликованных научных работ многих отечественных и зарубежных авторов. Среди

зарубежных авторов необходимо выделить работы следующих ученых [2-16].

В статье Matijosius J. и др. выполнены достоверные расчеты, позволяющие оценить изменение управляемости лесовозного автомобиля Volvo FH с лесоматериалами при: его резких торможениях, ускорениях в процессе преодоления поворотов на лесовозной дороге; изменении веса лесоматериалов; различных вариантах размещения лесоматериалов в кузове лесовозного автомобиля. Критериями, оказывающими влияние на управляемость и безопасность движения лесовозного автомобиля, были приняты такие параметры динамики лесовозного автомобиля, как скорость движения, крен, силы тяжести, трения, инерции, а также центробежная сила. Установлено, что силы инерции и тяжести оказывают наибольшее влияние при вывозке лесоматериалов на лесовозный автомобиль [2].

Hui Li и др. в своей работе рассмотрели вопрос автоматического изменения диаметра бревен, загруженных на лесовозный автопоезд с точки зрения важной части логистического процесса вывозки лесоматериалов. Установлено, что ручной метод определения диаметра бревен является неэффективным и способствует снижению производительности вывозки лесоматериалов. С целью ускорения и повышения точности автоматического определения диаметра бревен, загруженных на лесовозный автопоезд, предложен метод быстрой сегментации, основанный на технологии компьютерного зрения и работе нейронной сети, обеспечивающий извлечение цветного изображения, полученного со смартфона, с последующим встраиванием векторного изображения из входного снимка. При реализации данного метода было выявлено, что производительность процесса измерения значительно снижается при увеличении расстояния съемки и угла наклона камеры при съемке. Основными причинами этого являлись трудности обнаружения и обработки мелких и плотно упакованных изображений бревен. Ожидается, что практическое использование предложенного метода позволит повысить эффективность измерения бревен и значительно снизит стоимость вывозки лесоматериалов лесовозными автопоездами [3].

Tadeusz Moskalik и др. в своем исследовании рассмотрели вопрос необходимости повышения точности измерения объема лесоматериалов различных пород с целью обеспечения максимальной загрузки лесовозного автопоезда с учетом его допустимой полной массы и изменчивости влажности древесины. В данной работе выполнено сравнение фотооптического метода определения объема и веса, перевозимых лесовозным автопоездом лесоматериалов с методом лазерного сканирования. Установлено, что применение рассмотренных методов определения объема и веса лесоматериалов не учитывают изменчивость плотности древесины при различной влажности, погодных и сезонных условиях. Это приводит к тому, что лесовозные автопоезда в большинстве случаев оказываются перегруженными, что существенно ускоряет разрушение опорной поверхности лесовозных дорог, а также ухудшает безопасность их движения в процессе вывозки лесоматериалов [4].

Abdullah E. Akay и др. в своей статье рассмотрели вопрос эффективного планирования производственных затрат при вывозке лесоматериалов лесовозными автомобилями. Исследование метода сетевого анализа, позволяющего определить оптимальные маршруты вывозки лесоматериалов с минимальными затратами, позволило установить, что грузоподъемность лесовозных автомобилей оказывает существенное значение на изменение стоимости вывозки лесоматериалов. Кроме этого, включение дополнительных лесных складов в план транспортировки дает возможность значительно сократить себестоимость процесса вывозки лесоматериалов при одновременном увеличении общей прибыли от лесопроизводства [5].

В работе Tomas Zemanek и др. был рассмотрен вопрос проектирования и эксплуатационной оценки лесовозного тягача с прицепом, оснащенный гибридным приводом. Источником электроэнергии для двух асинхронных двигателей, приводящих в движение передние колеса тандемной оси прицепа, являлась аккумуляторная батарея, которая подзаряджалась от асинхронной машины, работающей в качестве генератора в периоды пониженного потребления мощности дизельным двигателем тягача.

Электропривод был рассчитан на заданный цикл работы тягача с прицепом, а его нагрузочные характеристики испытаны в лаборатории. Максимальная пиковая мощность, потребляемая от аккумуляторной батареи, составила 33 кВт. В сложных дорожных условиях электропривод разгружает в работе двигатель внутреннего сгорания только тогда, когда загруженный лесоматериалами тягач с прицепом осуществляет движение на подъеме [6].

Pavel Scvor и др. исследовали в своей работе изменение работоспособности водителя лесовозного автопоезда от режима движения, параметров лесовозной дороги, а также загруженности автопоезда. Выявлено, что при вождении лесовозного автомобиля с прицепом, мышечная нагрузка водителя на лесовозных дорогах была на 39,4 % больше, чем на дорогах общего пользования. Повышение нагрузок на мышцы связано с движением автопоезда по узким и часто извилистым недостаточно обустроенным лесовозным дорогам, требующим более частых торможений и переключений на пониженную передачу с последующим ускорением и переключением на повышенную передачу. Установлено также, что водители более загруженных лесоматериалами лесовозных автопоездов, движущихся по лесовозным дорогам более низкого уровня обустроенности, испытывают большие стресс и утомление, что ведет к снижению работоспособности [7].

Karha K. и др. в своем исследовании выполнили сравнение расхода топлива при вывозке лесоматериалов двумя лесовозными автопоездами, массами 92 и 76 тонн с лесоперерабатывающих терминалов потребителям. Установлено, что средний вес полезной нагрузки у лесовозного автопоезда, массой 92 тонны был на 27 % выше, чем у лесовозного автопоезда, массой 76 тонн. Расход топлива у обоих исследуемых автопоездов при вывозке лесоматериалов был выше в зимний период времени, в сравнении с летним периодом. Лесовозный автопоезд, массой 92 тонны имел на 8-11 % меньший расход топлива, чем лесовозный автопоезд, массой 76 тонн при расстоянии вывозки лесоматериалов от 100 до 300 км. Рекомендовано с целью достижения большей экономии топлива и более высоких экологических показателей увеличить количество используемых для вывозки лесоматериалов лесовозных автопоездов, массой 92 тонны [8].

Sahar Andini в своей работе исследовал влияние различных факторов на эффективность функционирования лесовозных автопоездов. Установлено, что уровень обустроенности лесовозных дорог должен соответствовать техническим требованиям для выполнения должным образом своих важнейших функций. Кроме этого, выявлено, что общая производительность процесса вывозки лесоматериалов зависит от: времени вывозки, расстояния, скорости движения, объема вывозимой древесины, характеристик лесовозных дорог (подъемов, спусков, погодных условий, квалификации водителей, рельефа местности, возможностей выполнения технического обслуживания в полевых условиях). Вывозка лесоматериалов по временным лесовозным дорогам сопровождается их повреждением и возникновением на них колеи, которые могут препятствовать движению автопоезда, снижать скорость и безопасность движения, ускорять повреждение деталей и узлов лесовозного тягача, а также прицепа [9].

Grzegorz Tizcinski и др. в своей статье исследовали изменение нагрузок на осях лесовозных автопоездов в процессе вывозки лесоматериалов в различные сезоны года, в зависимости от типа компонования лесовозного автопоезда и вида вывозимой древесины. Установлено, что наименьшая осевая нагрузка приходится на передние оси всех исследуемых лесовозных автопоездов. В лесовозных автомобилях с прицепами, самые высокие средние нагрузки на ось приходятся на четвертую и пятую оси в диапазоне от 8,5 до 12 тонн. Распределение полной массы по лесовозному автопоезду составляет 58-60 % на трехосный лесовозный тягач и 40-42 % – на трехосный прицеп или полуприцеп [10].

Smidt M.F. и др. в своей работе выполнили исследование влияния квалификации водителей на безопасность и эффективность процесса транспортирования древесины лесовозным автомобильным транспортом. Водители лесовозного автомобильного транспорта составляют более 20 % всех работников лесозаготовительной отрасли. Вождение лесовозных автопоездов сопряжено с дополнительными трудностями при вождении по лесовозным дорогам низкой степени обустроенности, а также при погрузочно-разгрузочных работах. От уровня квалификации водителей и срока эксплуатации лесовоз-

ных автомобилей с прицепами зависит риск возникновения дорожно-транспортных происшествий. Установлено, что своевременное повышение квалификации водителей лесовозных автопоездов позволяет снизить риски возникновения аварий при вывозке лесоматериалов. Это достигается за счет улучшения осведомленности о ситуации на лесовозных дорогах, управления поведением в зависимости от утомляемости и усталости водителя, а также уменьшения ошибок и повышения навыков вождения [11].

Xuejing Du и др. исследовали в своей статье безопасность движения тягачей с прицепами в экстремальных дорожных условиях в холодных горных районах. В качестве показателей, определяющих безопасность движения на основе определения бокового скольжения и опрокидывания автопоезда, были выбраны следующие факторы: коэффициент сцепления, скорость движения, величина бокового ветра, поперечное ускорение, радиус поворота дороги, а также коэффициент отклонения от вертикальной нагрузки. Выявлено, что повышение величины бокового ветра способствует ухудшению бокового скольжения автопоезда. Установлено, что движение тягача с прицепом со скоростью в интервале от 0 до 30 км/ч является безопасным. Однако, при увеличении величины бокового ветра, безопасная скорость движения автопоезда снижается. Центр тяжести автопоезда существенно влияет на аэродинамические характеристики транспортного средства. При низком коэффициенте сцепления ледового и снежного покрытий дороги, предел бокового ускорения автопоезда ниже, чем у сухого покрытия дороги. Из-за низкого коэффициента сцепления с дорогой, при скорости выше 40 км/ч, колеса автопоезда начинают проскальзывать, ухудшая управление, а при резком торможении на такой скорости, происходит опрокидывание тягача с прицепом [12].

Jean-Francois Audy и др. в своей работе основное внимание уделили методам компьютерного оперативного планирования вывозки лесоматериалов для определения оптимального набора маршрутов применительно к парку лесовозных автопоездов, осуществляющих вывозку лесоматериалов из заданных мест заготовки потребителям. Такое оперативное планирование позволяет повысить эффективность использования лесовозных автопоездов за

счет минимизации общего расстояния в пути, расстояния в пути порожнего автопоезда, времени непродуктивной деятельности, вредных выбросов в окружающую среду, а также за счет снижения транспортных расходов. Установлено, что задачи маршрутизации лесовозных автотранспортных средств при вывозке лесоматериалов отличаются от задач маршрутизации транспортных средств общего пользования. При решении таких задач необходимо учитывать: имеющийся подвижной парк лесовозных автопоездов различного компонования; полную или частичную загрузку автопоездов; расстояние вывозки; погодные условия и состояние лесовозных дорог; изменение наличия лесоматериалов на лесозаготовительных участках; количество заездов на один и тот же объект; необходимость транспортирования различных сортов древесины между многими лесозаготовительными предприятиями и потребителями. Кроме этого, необходимо обеспечить управление операциями погрузки, разгрузки и вывозки лесоматериалов в режиме реального времени для исключения простоев автопоездов и синхронизировать работу лесовозных автопоездов без средств самопогрузки с автономными погрузчиками [13].

Perttu Anttila и др. в своей статье выполнили оценку изменения расхода топлива 13 типовыми лесовозными автопоездами в зависимости от времени года, расстояния вывозки, массы, характеристик транспортных средств и лесовозных дорог, а также от погодных условий. Установлено, что наибольший расход топлива у исследуемых автопоездов зафиксирован в зимний период, а наименьший – в летний период. Увеличение максимальной мощности двигателя автопоезда, а также количества и размеров шин оказывают влияние на рост расхода топлива. Частые повороты, подъемы, кривизна, неровности и дефекты, имеющиеся на лесовозной дороге также увеличивают расход топлива. Средний расход топлива уменьшается с увеличением расстояния вывозки, поскольку уменьшается доля лесовозных дорог, увеличивается доля дорог высокого уровня качества, обеспечивающая движение автопоезда с более стабильной скоростью, кроме этого, погрузочно-разгрузочные операции выполняются реже при вывозке лесоматериалов на дальние расстояния, чем на короткие. Расход топлива автопоездом зависит от состояния лесовозных дорог, на которое может вли-

ять погодные условия (осадки, изменение температуры, влажности). Также, на расход топлива оказывает влияние стаж водителя автопоезда, стиль вождения, внимательность, соблюдение скоростного режима движения и количество резких троганий и торможений [14].

Heikki Liimatainen и др. исследовали влияние использования 76 и 90 тонных большегрузных лесовозных автопоездов с шарнирно-сочлененной рамой, задействованных в процессе вывозки лесоматериалов на изменение объемов вывозимых лесоматериалов, транспортных расходов и вредных выбросов в окружающую среду. Установлено, что с увеличением длины и веса лесовозного автопоезда более эффективно используются ресурсы, т.е. практическое применение более крупных транспортных средств повышает эффективность процесса вывозки лесоматериалов. Переход с 60 тонных лесовозных автопоездов на 90 тонные может сократить пробег лесовозных автопоездов на 20 %, расход топлива на 6 %, вредные выбросы на 3,6 %, что существенно отразится на снижении транспортных расходов [15].

Sasanka Katreddi и др. исследовали влияние различных факторов на изменение топливной экономичности большегрузных автопоездов. Топливная эффективность большегрузных автопоездов может быть выгодна не только для автомобильной промышленности, но и для экономики страны в целом. Стоимость потребляемого топлива составляет примерно 30 % стоимости жизненного цикла большегрузного автопоезда. Сокращение расхода топлива всего на несколько процентов позволит значительно снизить затраты транспортной отрасли. Прогнозирование расхода топлива за поездку на основе динамических дорожных данных (параметров дороги, поведения водителя, погодных условий, характеристик транспортного средства) дает возможность автомобильной промышленности снизить затраты и время на дорожные испытания. Использование нейронной искусственной сети для прогнозирования изменения расхода топлива в современных большегрузных автопоездах, учитывающей нагрузку и частоту вращения коленчатого вала двигателя, а также скорость автопоезда, позволяет оптимизировать работу автопарка на различных маршрутах движения [16].

Выполненное поисковое исследование, позволило установить, что наиболее значимыми факторами, влияющими на изменение транспортных издержек, затрачиваемых на вывозку лесоматериалов лесовозным автомобильным транспортом, являются: квалификация, дисциплинированность и стаж водителей, стиль вождения, внимательность, соблюдение скоростного режима движения; разнообразие подвижного парка лесовозного автомобильного транспорта, их конструктивные особенности; компонование лесовозного автопоезда; оснащение прицепа автопоезда гибридным приводом; управляемость и безопасность движения, собственная масса и длина лесовозного автопоезда; срок эксплуатации лесовозного автопоезда, его максимальная полезная загруженность; способ загрузки и разгрузки лесоматериалов; рациональная схема размещения лесоматериалов в кузове автомобиля и прицепного звена; надежность крепления лесоматериалов; точность определения диаметра бревен, загружаемых на лесовозный автопоезд; изменчивость веса и плотности лесоматериалов при различной влажности, погодных и сезонных условиях; скорость движения и расстояние транспортировки лесоматериалов; наличие возможности осуществления технического обслуживания и ремонта автопоезда в полевых условиях; степень обустроенности лесовозных дорог (наличие дефектов, неровностей и препятствий); параметры лесовозных дорог (уклоны, подъемы, длина, тип, кривизна, повороты); количество резких торможений, троганий и ускорений при движении по лесовозной дороге низкой степени обустроенности; режимы погоды, характерные для данной местности; оперативно-календарное планирование, а также оптимальность маршрута движения при транспортировании лесоматериалов потребителям.

Одним из направлений, способствующих существенному сокращению транспортных расходов, затрачиваемых на вывозку древесины потребителям лесовозными автопоездами, является разработка для лесовозных автомобилей с прицепами и исследование новых конструкций тягово-сцепных устройств. Их применение позволит повысить надежность автопоезда за счет демпфирования динамических нагрузок между его звеньями, а также снизить расход топлива, за счет преобразования, накопления в

пневмогидроаккумуляторе и дальнейшего использования в технологическом гидравлическом оборудовании энергии рабочей жидкости. Результаты исследований, проведенные ранее авторами, позволили предложить перспективную конструкцию дышла сцепного устройства лесовозного автопоезда с функцией самовытаскивания (рис. 1). Помимо рекуперации энергии рабочей жидкости, такое дышло сцепного устройства обеспечивает лесовозному автомобилю с прицепом эффект самовытаскивания, что улучшает его проходимость при преодолении различных препятствий и неровностей, имеющих в большом количестве на временной лесовозной дороге [18].

Цель работы достигается за счет использования метода имитационного моделирования, позволяющего исследовать функционирование рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного

устройства в режиме самовытаскивания лесовозного автопоезда.

Материалы и методы

Предмет и объект исследования

Объектом исследования в данной работе является процесс функционирования сцепного устройства новой конструкции, установленного в лесовозном автопоезде при движении автопоезда по лесовозным дорогам с различной степенью обустроенности.

В качестве предмета исследования выступают закономерности влияния средней глубины h_{holl} , неровностей, имеющих на лесовозной дороге и коэффициента вязкого трения k_{visc} , колес лесовозного автопоезда на среднюю скорость самовытаскивания $v_{\text{self-pull}}$, величину перемещения (отката) назад лесовозного автопоезда x_{rollb} и потребляемую предлагаемым дышлом сцепного устройства мощность N_{cons} .

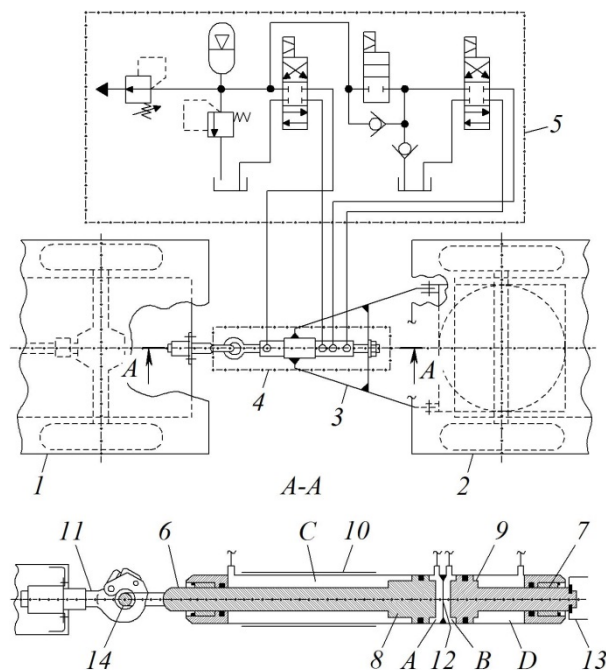


Рисунок 1. Конструкция дышла сцепного устройства автопоезда: 1 – лесовозный тягач; 2 – прицепное звено; 3 – дышло сцепного устройства; 4 – последовательно соединенные торцами два гидроцилиндра двухстороннего действия; 5 – гидропривод; A, B и C, D – поршневые и штоковые полости гидроцилиндров двухстороннего действия; 6, 7 и 8, 9 – штоки и поршни гидроцилиндров двухстороннего действия; 10 – корпус дышла; 11 – крюк; 12 – герметичная перегородка; 13 – поперечина дышла; 14 – присоединительное кольцо

Figure 1. Design of the drawbar of the coupling device of a road train: 1 – timber tractor; 2 – trailed link; 3 – drawbar of the hitch; 4 – two double-acting hydraulic cylinders connected in series by the ends; 5 – hydraulic drive; A, B and C, D – piston and rod cavities of double-acting hydraulic cylinders; 6, 7 and 8, 9 – rods and pistons of double-acting hydraulic cylinders; 10 – drawbar body; 11 – hook; 12 – sealed partition; 13 – drawbar crossbar; 14 – connecting ring

Источник: собственная схема авторов

Source: authors' own scheme

Дизайн эксперимента или сбор данных

В современном машиностроении для оценки работоспособности новых технических решений, а также оптимизации их конструктивных параметров широко используется метод математического и компьютерного моделирования. На основании этого, в данной работе поставлена задача, разработать для предложенной авторами конструкции рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства автопоезда математическую модель и реализующие ее компьютерные программы. Такая математическая модель должна позволить оценить эффективность работы рекуперативного дышла сцепного устройства в режиме работы при самовытаскивании автопоезда, а также

эффективность автопоезда при движении по лесовозной дороге различной степени обустроенности.

Исследуемый автопоезд состоит из лесовозного трехосного тягача и трехосного прицепа, которые представлены в математической модели двумя абсолютно твердыми телами. Два этих тела движутся в пространстве и взаимодействуют друг с другом по закону динамики через рекуперативное пневмогидравлическое дышло сцепного устройства AB (рис. 2). Кроме этого, в рамках упруго-вязкого приближения, лесовозный автопоезд взаимодействует с моделируемой опорной поверхностью через подвеску и колеса. Для трехосного лесовозного автомобиля и трехосного прицепа рассматриваются по шесть точек касания с опорной поверхностью лесовозной дороги.

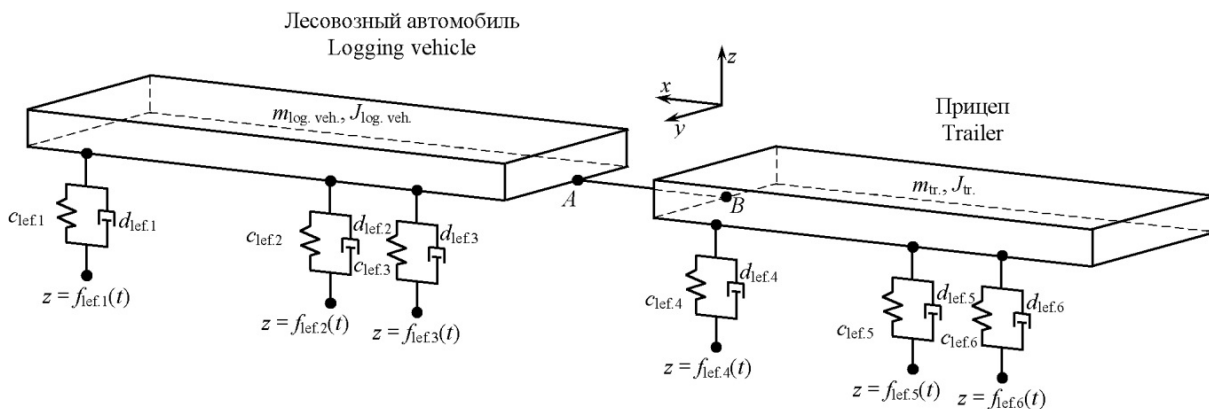


Рисунок 2. Расчетная схема автопоезда, оснащенного рекуперативным дышлом сцепного устройства, обеспечивающим эффект самовытаскивания

Figure 2. Calculation scheme of a road train equipped with a regenerative drawbar of the coupling device, providing the effect of self-pulling

Источник: собственная схема авторов
Source: authors' own schema

Массы ходовой части лесовозного автомобиля и прицепа составляли фиксированные величины $m_{\text{timb. tract.}}$ и $m_{\text{trail.}}$. Однако их моменты инерции $J_{\text{trail.}}$ и $J_{\text{timb. tract.}}$ необходимо было регулярно пересчитывать для текущего момента времени относительно мгновенных осей вращения ходовой части. В процессе моделирования постоянно пересчитывались координаты центров тяжести лесовозного автомобиля ($x_{\text{timb. tract.}}$, $y_{\text{timb. tract.}}$, $z_{\text{timb. tract.}}$) и прицепа ($x_{\text{trail.}}$, $y_{\text{trail.}}$, $z_{\text{trail.}}$), а также углы ориентации ($\varphi_{x \text{ timb. tract.}}$, $\varphi_{y \text{ timb. tract.}}$, $\varphi_{z \text{ timb. tract.}}$), ($\varphi_{x \text{ trail.}}$, $\varphi_{y \text{ trail.}}$, $\varphi_{z \text{ trail.}}$) хо-

довой части указанных тел относительно неподвижной системы координат. Движение автопоезда с новым дышлом сцепного устройства описывалось в математической модели системой дифференциальных уравнений второго порядка, аналогично представленным в работах [1, 17]. Отличием этих дифференциальных уравнений, составленных на основе закона Ньютона и основного уравнения динамики вращательного движения, является представление в модели лесовозного автопоезда в составе трехосного лесовозного автомобиля и трехосного прицепа.

$$\left\{ \begin{aligned} m_{timb.tract.} \frac{d^2 x_{timb.tract.}}{dt^2} &= \sum_{i=1}^3 (F_{lef.i}^x + F_{righ.i}^x) + F_A^x; \\ m_{timb.tract.} \frac{d^2 y_{timb.tract.}}{dt^2} &= \sum_{i=1}^3 (F_{lef.i}^y + F_{righ.i}^y) + F_A^y; \\ m_{timb.tract.} \frac{d^2 z_{timb.tract.}}{dt^2} &= -m_{timb.tract.} g + \sum_{i=1}^3 (F_{lef.i}^z + F_{righ.i}^z) + F_A^z; \\ J_{timb.tract.x} \frac{d^2 \varphi_{x\ timb.tract.}}{dt^2} &= \sum_{i=1}^3 (M^x(F_{lef.i}) + M^x(F_{righ.i}) + M^x(F_A)); \\ J_{timb.tract.y} \frac{d^2 \varphi_{y\ timb.tract.}}{dt^2} &= \sum_{i=1}^3 (M^y(F_{lef.i}) + M^y(F_{righ.i}) + M^y(F_A)); \\ J_{timb.tract.z} \frac{d^2 \varphi_{z\ timb.tract.}}{dt^2} &= \sum_{i=1}^3 (M^z(F_{lef.i}) + M^z(F_{righ.i}) + M^z(F_A)); \end{aligned} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{aligned} m_{trail.} \frac{d^2 x_{trail.}}{dt^2} &= \sum_{i=4}^6 (F_{lef.i}^x + F_{righ.i}^x) + F_B^x; \\ m_{trail.} \frac{d^2 y_{trail.}}{dt^2} &= \sum_{i=4}^6 (F_{lef.i}^y + F_{righ.i}^y) + F_B^y; \\ m_{trail.} \frac{d^2 z_{trail.}}{dt^2} &= -m_{trail.} g + \sum_{i=4}^6 (F_{lef.i}^z + F_{righ.i}^z) + F_B^z; \\ J_{trail.x} \frac{d^2 \varphi_{x\ trail.}}{dt^2} &= \sum_{i=4}^6 (M^x(F_{lef.i}) + M^x(F_{righ.i}) + M^x(F_B)); \\ J_{trail.y} \frac{d^2 \varphi_{y\ trail.}}{dt^2} &= \sum_{i=4}^6 (M^y(F_{lef.i}) + M^y(F_{righ.i}) + M^y(F_B)); \\ J_{trail.z} \frac{d^2 \varphi_{z\ trail.}}{dt^2} &= \sum_{i=4}^6 (M^z(F_{lef.i}) + M^z(F_{righ.i}) + M^z(F_B)); \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где $F_{lef.i}$ и $F_{righ.i}$ – силы, которые передаются от колес через подвеску лесовозного автопоезда i -й оси, соответственно по левому и правому бортам; $F_A^x, F_A^y, F_A^z, F_{Bx}, F_{By}, F_{Bz}$ – составляющие сил, действующие со стороны рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства на лесовозный автомобиль и прицеп; t – время; M^i – моменты сил $F_{lef.i}, F_{righ.i}, F_A^x, F_A^y, F_A^z, F_{Bx}, F_{By}, F_{Bz}$ относительно оси i .

Для упрощения модели взаимодействие между лесовозным автомобилем и прицепом с опорной поверхностью лесовозной дороги считали упруго-вязким. Для каждой точки касания опорной поверхности лесовозной дороги с лесовозным автомобилем или прицепом использовали следующее уравнение для расчета вертикальной силы, действующей на корпус лесовозного автопоезда [1]:

$$F_i^z = c_i (z_{surf.i}(x_i, y_i) + R_{wh.} - z_{wh.i}) - d_i \left(\frac{\partial z_{surf.i}(x_i, y_i)}{\partial t} - \frac{\partial z_{wh.i}}{\partial t} \right), \quad (3)$$

где i – номер исследуемого колеса лесовозного автопоезда; $R_{wh.}$ – радиус колеса; $z_{surf.i}(x, y)$ – вертикальная координата опорной поверхности лесовозной дороги под колесом автопоезда; $z_{surf.i}$ – вертикальная координата точки присоединения колеса к лесовозному автопоезду; c_i, d_i – коэффициенты, характеризующие жесткость, а

также демпфирование при упруго-вязком взаимодействии.

Для обеспечения адекватности математической модели реальному процессу в ней также осуществляется учет, как поперечных составляющих сил, так и горизонтальных продольных сил сцепле-

ния колес лесовозного автопоезда с опорной поверхностью лесовозной дороги. Решение этих дифференциальных уравнений в разработанной математической модели осуществляется на основе метода Рунге-Кутты второго порядка. Формула, по которой осуществлялся расчет соответствующих параметров (сил и моментов, действующих на автопоезд) на основании координат x_τ и скоростей движения $v_{x\tau}$ моделируемого объекта для последующего шага интегрирования $\tau + 1$ при дискретизации времени на равные промежутки Δt имеет следующий вид [1]:

$$\begin{cases} x_{\tau+1} = x_\tau + v_{x\tau} \cdot \Delta t + \frac{F_{x\tau}}{m} \cdot \frac{(\Delta t)^2}{2}; \\ v_{x\tau+1} = v_{x\tau} + \frac{F_{x\tau}}{m} \cdot \Delta t, \end{cases} \quad (4)$$

Таким же образом осуществлялся расчет декартовых составляющих y и z , а также угловых координат для лесовозного автопоезда.

Одним из способов представления возможных неровностей, а также дефектов, имеющих на недостаточно обустроенной лесовозной дороге, является описание функции рельефа как комбинации множества неровностей гауссовой формы. Такое описание позволяет выполнять моделирование различных по уровню обустроенности лесовозных дорог (рис. 3).

Формула, описывающая функцию изменения высоты опорной поверхности лесовозной дороги от координат точки контакта колеса $z(x, y)$ лесовозного автопоезда, имеет следующий вид [1]:

$$z(x, y) = H_0 - \sum_{i=1}^{N_B} H_i \exp\left(-\frac{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}{\sigma_i^2}\right), \quad (5)$$

где H_0 – базовый уровень поверхности лесовозной дороги, относительно которого формируются неровности (в дальнейших расчетах $H_0 = 0$); N_B – количество гауссовых неровностей.

В математической модели рекуперативное пневмогидравлическое дышло сцепного устройства представлено последовательно соединенными свободными торцами двумя гидроцилиндрами двухстороннего действия. Первый гидроцилиндр (входы 1, 2 на рис. 4) выполняет функцию демпфирования продольных колебаний звеньев лесовозного

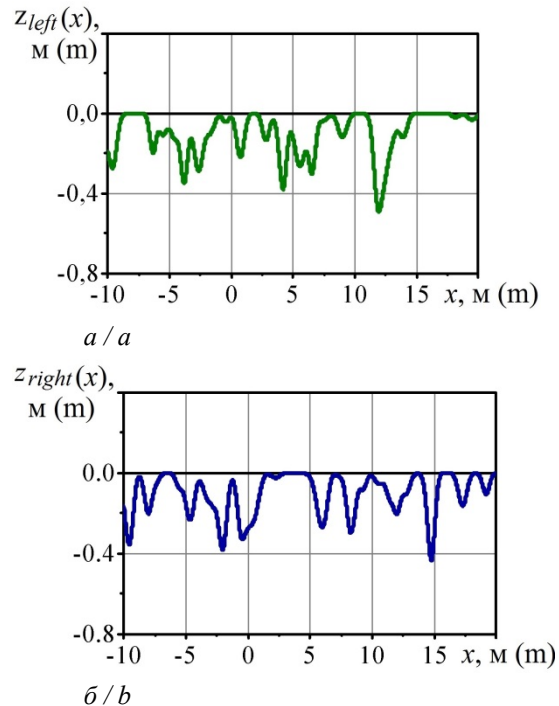


Рисунок 3. Зависимости высоты опорной поверхности $z(x)$ от продольной координаты x : a – функция рельефа поверхности для колес левого борта; b – функция рельефа поверхности для колес правого борта

Figure 3. Dependences of the height of the support surface $z(x)$ on the longitudinal coordinate x : a – function of the surface topography for the left side wheels; b – surface topography function for starboard wheels

Источник: собственные вычисления авторов
Source: authors' own calculations

автопоезда, второй гидроцилиндр (входы 3, 4 на рис. 4) – функцию рекуперации энергии, совместная же работа двух гидроцилиндров обеспечивает эффект самовытаскивания лесовозного тягача с прицепом. Поршни гидроцилиндров перемещаются в математической модели под действием продольной силы между лесовозным автомобилем и прицепом, а также сил, действующих со стороны рабочей жидкости, имеющейся в поршневых 2, 3 и штоковых 1, 4 полостях.

Гидравлический подсистема дышла сцепного устройства представлена в математической модели в виде двух поршневых и двух штоковых полостей, содержащих рабочую жидкость, а также

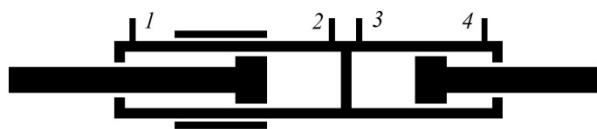


Рисунок 4. Представление в компьютерной программе дышла сцепного устройства, обеспечивающего рекуперацию энергии и функцию самовытаскивания лесовозного автопоезда

Figure 4. Representation in the computer program of the drawbar of the coupling device, which provides energy recovery and the function of self-pulling of a timber road train

Источник: собственная схема авторов

Source: authors' own schema

одной жидкостной полости - пневмогидроаккумулятора. В зависимости от режима движения лесовозного автопоезда (торможение, ускорение) все рассматриваемые полости взаимодействуют друг с другом, а также с присоединительным портом, через гибкие, напорные, сливной, всасывающий и всасывающе-сливные трубопроводы. Зависимости, позволяющие определить расход Q_{ij} гидравлической рабочей жидкости, скорость v_{pneum} перемещения поршня и изменение давления в жидкостной P_{liq} и газовой P_{gas} полостях пневмогидроак-

$$x_{roll} = \frac{1}{2 \cdot N_{leng.-shot}} \sum_{i=1}^{N_{leng.-shot}} \left((x_{timb.tract.}(t_{i3}) - x_{timb.tract.}(t_{i4})) + (x_{trail.}(t_{i1}) - x_{trail.}(t_{i2})) \right), \quad (7)$$

где $N_{leng.-short}$ – количество циклов удлинения-сокращения дышла сцепного устройства ($N_{leng.-short}$ должно быть не менее пяти в компьютерном эксперименте); i – номер цикла удлинения-сокращения дышла сцепного устройства; $x_{timb.tract.}$ и $x_{trail.}$ – продольные декартовы координаты лесовозного автомобиля и прицепа; t_{i1} , t_{i2} , t_{i3} , t_{i4} – моменты времени в

$$N_{cons.} = \frac{\pi D_{hydr.cyl.}^2}{4 \left[t_{comp.ex.} / \Delta t \right]} \sum_{\tau=1}^{\lceil t_{comp.ex.} / \Delta t \rceil} \left(\frac{L^\tau - L^{\tau-1}}{\Delta t} \left| P_1^\tau - P_2^\tau + P_3^\tau - P_4^\tau \right| \right), \quad (8)$$

где $D_{hydr.cyl.}$ – внутренний рабочий диаметр гидроцилиндра, состоящего из последовательно соединенных свободными торцами двух гидроцилин-

кумулятора, описаны в более ранних работах авторов [1, 17]. Отличием от ранее разработанной математической модели, является то, что для оценки эффективности процесса самовытаскивания лесовозного автопоезда рекуперативным пневмогидравлическим дышлом сцепного устройства, используются три новые введенные показателя.

Средняя скорость самовытаскивания $v_{self.-pull}$ рассчитывается по формуле:

$$v_{self.-pull} = \frac{x_{cent.of grav.}(t_2) - x_{cent.of grav.}(t_1)}{t_2 - t_1}, \quad (6)$$

где $x_{cent.of grav.}(t)$ – продольная декартова координата центра тяжести лесовозного автомобиля; t_1 и t_2 – моменты времени, в которые начинается и заканчивается процесс самовытаскивания лесовозного автопоезда. Для достаточно качественного усреднения результатов процесс самовытаскивания должен заключаться не менее чем в пяти циклах удлинения-сокращения рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства.

Средняя величина значения перемещения (отката) $x_{от}$ назад лесовозного автопоезда за однократное удлинение-сокращение рекуперативного дышла определяется по формуле:

цикле i , в которые соответственно начинается удлинение дышла, завершается удлинение дышла, начинается сокращение дышла, завершается сокращение дышла.

Средняя потребляемая рекуперативным дышлом сцепного устройства мощность $N_{cons.}$ рассчитывается по формуле:

дров двухстороннего действия; $t_{comp.ex.}$ – длительность компьютерного эксперимента; Δt и τ – шаг и номер его интегрирования дифференциальных уравнений по времени; $[\dots]$ – оператор округления до

целого числа; L^r – длина рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства; P_k^r – давление рабочей жидкости в полости k гидроцилиндра.

Для имитационного моделирования движения лесовозного автопоезда оснащенного предлагаемым дышлом сцепного устройства и работы дышла отдельно в режимах самовытаскивания, рекуперации и демпфирования динамических нагрузок разработаны две компьютерные программы. Первая – «Программа для моделирования работы дышла сцепного устройства автопоезда в режиме рекуперации энергии». Вторая – «Программа для моделирования процесса самовытаскивания лесовозного автопоезда дышлом сцепного устройства. Интерфейсные формы вывода результатов экспериментов, полученные в этих компьютерных программах, приведены на рисунках 5, 6 [19, 20].

При теоретическом исследовании эффективности разработанного рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства в процессе самовытаскивания необходимо установить, как влияют геометрические и кинематические параметры рекуперативного дышла сцепного устройства и параметры опорной поверхности лесовозной дороги на показатели интенсивности и затрат мощности процесса самовытаскивания (рис. 7).

К параметрам рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства лесовозного автопоезда относятся: D_{hydr} – внутренний рабочий диаметр гидроцилиндра; ΔL – величина хода рекуперативного дышла сцепного устройства; v_{draw} – скорость удлинения (или сокращения) рекуперативного дышла сцепного устройства; $\Delta t_{el.cont}$ – интервал времени между последовательными процессами удлинения и сокращения. Основными параметрами различной степени обустроенности лесовозной дороги, являются: h_{hol} – средняя глубина случайных неровностей; k_{vis} – коэффициент вязкого трения колес об опорную поверхность. Эффективность процесса самовытаскивания лесовозного автопоезда дышлом сцепного устройства оценивается следующими показателями: $v_{self-pull}$ – средняя скорость са-

мовытаскивания; x_{roll} – средняя величина перемещения (отката) назад лесовозного автопоезда за однократное удлинение-сокращение рекуперативного дышла сцепного устройства; N_{cons} – средняя мощность, потребляемая при работе дышла автопоезда.

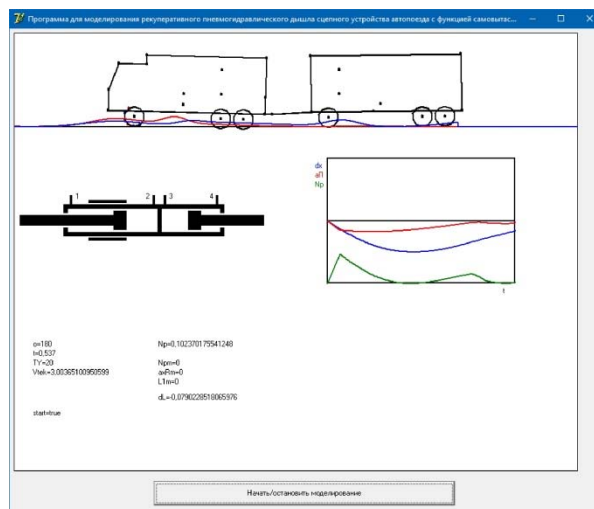


Рисунок 5. Интерфейсная форма с результатами моделирования

Figure 5. Interface form with simulation results

Источник: собственная схема авторов

Source: authors' own schema

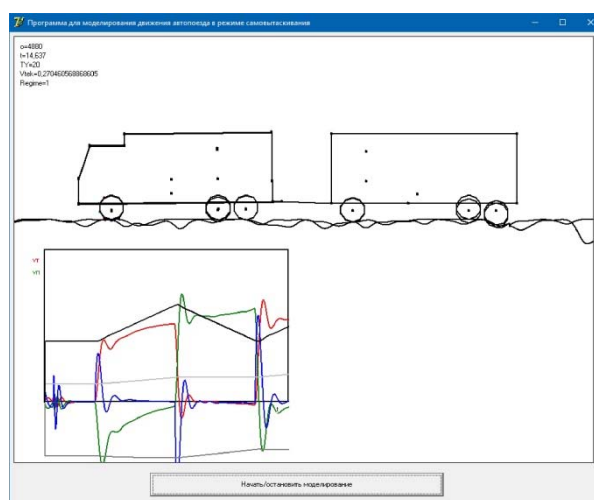


Рисунок 6. Интерфейсная форма с результатами моделирования

Figure 6. Interface form with simulation results

Источник: собственная схема авторов

Source: authors' own schema

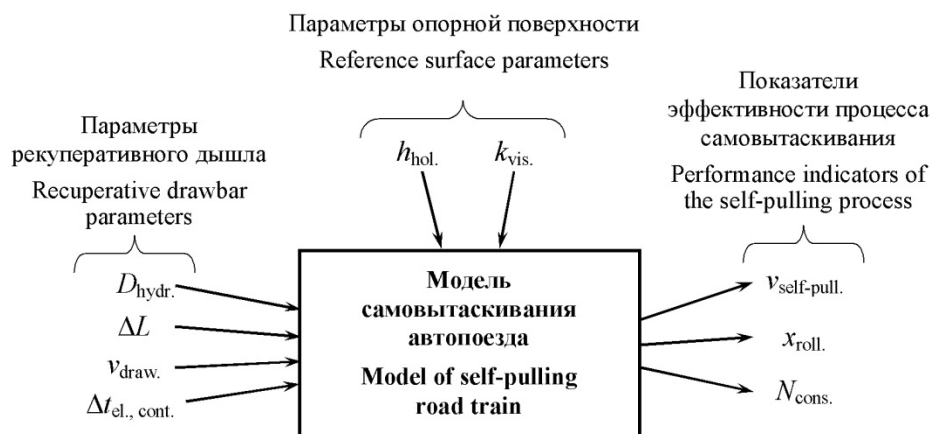


Рисунок 7. Задаваемые в модели входные характеристики и исследуемые выходные параметры

Figure 7. Input characteristics specified in the model and output parameters studied

Источник: собственная схема авторов

Source: authors' own schema

Результаты и обсуждения

В процессе исследования, выполняемого в компьютерных программах, требовалось установить зависимость влияния конструктивных параметров дышла автопоезда, геометрических параметров опорной поверхности лесовозной дороги на показатели эффективности процесса самовытаскивания лесовозного автомобиля с прицепом.

Теоретическое исследование осуществлялось путем проведения необходимого количества экспериментов в разработанных компьютерных программах с различными наборами параметров рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства, а также неровностей, имеющих на лесовозной дороге с различной степенью обустроенности. Каждый компьютерный эксперимент начинался с приведением лесовозного автопоезда в равновесное состояние с опорной поверхностью моделируемой лесовозной дороги. В начальный момент времени лесовозный автопоезд условно располагался на высоте около 1 м над опорной поверхностью лесовозной дороги (рис. 8, а). С началом численного интегрирования уравнений движения лесовозный автопоезд под действием сил тяжести двигался вниз и в определенный момент времени касался опорной поверхности лесовозной дороги (рис. 8, б). Упруго-вязкое взаимодействие лесовозного автопоезда с опорной поверхностью лесовозной дороги приводило к тому, что после нескольких затухающих колебаний (рис. 8, в) лесовозный автопоезд неподвижно останав-

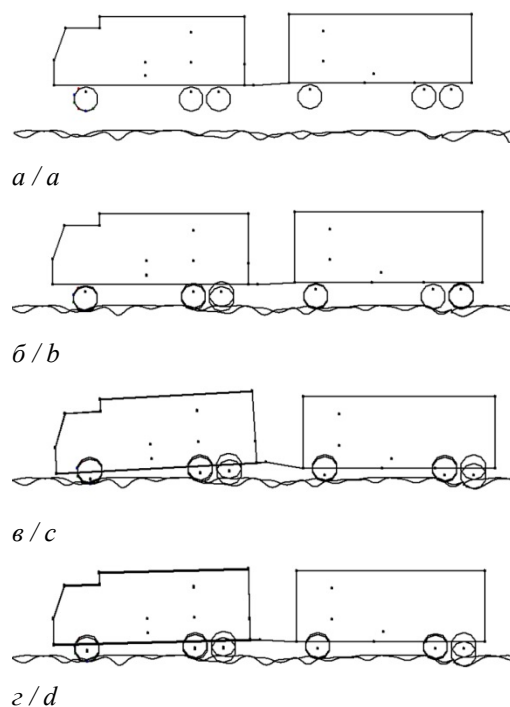


Рисунок 8. Приведение автопоезда в состояние равновесия: а – $t = 0$ с; б – $t = 0,48$ с; в – $t = 0,72$ с; г – $t = 1,62$ с

Figure 8. Bringing the road train into equilibrium: а – $t = 0$ s; б – $t = 0.48$ s; в – $t = 0.72$ s; г – $t = 1.62$ s

Источник: собственная схема авторов

Source: authors' own schema

ливался на опорной поверхности – приходил в состояние равновесия с момента начала компьютерного эксперимента к моменту времени около 1,62 с (рис. 8, з).

После этого в модели воспроизводилось циклическое удлинение и сокращение рекуперативного дышла сцепного устройства с поочередным торможением колес прицепа и лесовозного автомобиля соответственно (рис. 9). Первое удлинение рекуперативного дышла сцепного устройства на 1,2 м с одновременным торможением колес прицепа приводило к тому, что лесовозный автомобиль смещался

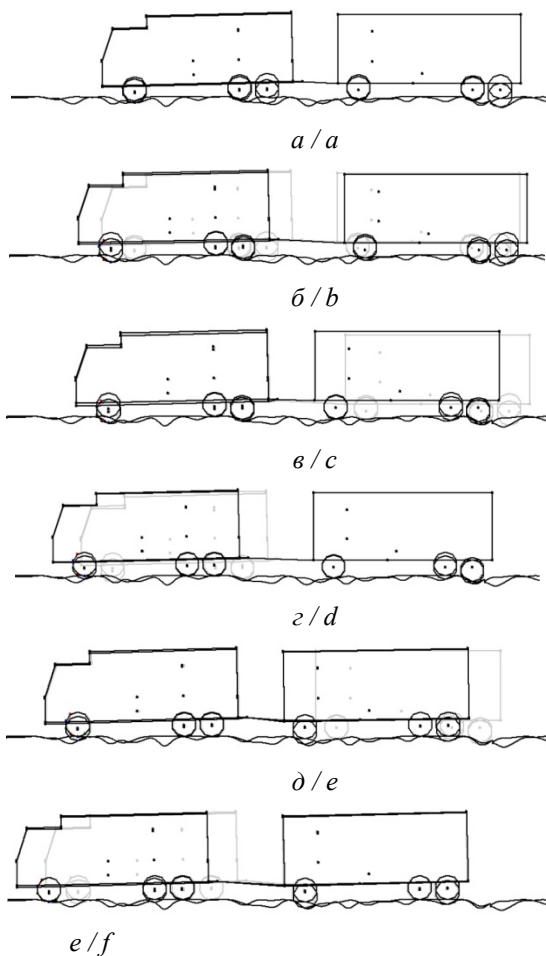


Рисунок 9. Последовательные удлинения и сокращения рекуперативного дышла при реализации режима самовытаскивания: $a - t = 3$ с; $б - t = 7,74$ с; $в - t = 12,54$ с; $г - t = 17,4$ с; $д - t = 22,2$ с; $е - t = 27$ с

Figure 9. Successive lengthening and contraction of the regenerative drawbar when implementing the self-pulling mode: $a - t = 3$ s; $b - t = 7.74$ s; $c - t = 12.54$ s; $d - t = 17.4$ s; $e - t = 22.2$ s; $f - t = 27$ s

Источник: собственная схема авторов
Source: authors' own scheme

вперед примерно на 0,9 м, а прицеп смещался назад (откат) примерно на 0,3 м – из-за вязкого трения заблокированных колес об опорную поверхность лесовозной дороги (рис. 9, а). Удлинение и сокращение рекуперативного дышла сцепного устройства производилось по линейному закону с одной и той же скоростью удлинения и сокращения (рис. 10, а). Как видно из зависимости продольной координаты x_{trail} прицепа от времени, в процессе удлинения

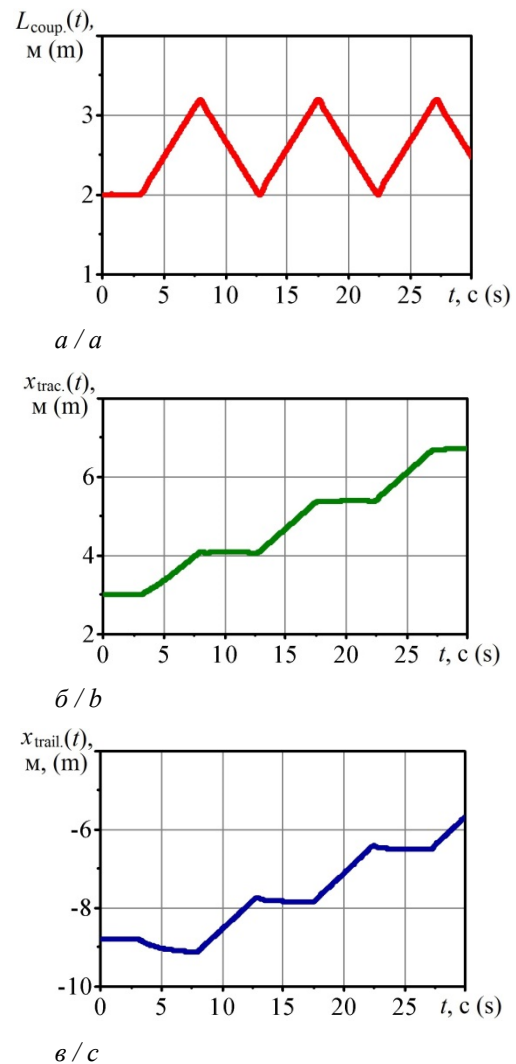


Рисунок 10. Зависимости от времени t длины L_{coup} рекуперативного дышла сцепного устройства (а), продольной координаты центров тяжести тягача x_{trac} (б) и прицепа x_{trail} (в)

Figure 10. Dependences on time t of the length L_{coup} regenerative hitch drawbar (a), longitudinal coordinates of the centers of gravity of the tractor x_{trac} (b) and trailer x_{trail} (c)

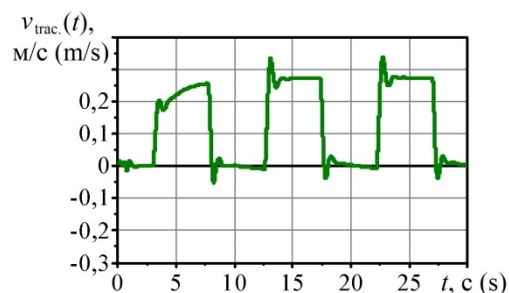
Источник: собственные вычисления авторов
Source: authors' own calculations

дышла, прицеп движется назад на незначительную величину (участки убывания) (рис. 10, б).

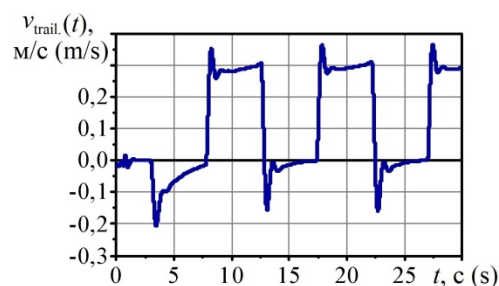
После первого удлинения дышла сцепного устройства в модели воспроизводилось сокращение длины дышла с одновременным блокированием колес лесовозного автомобиля (рис. 9, б). Так как удлинение и сокращения производятся непосредственно друг за другом, лесовозный автопоезд постепенно приобретает поступательную скорость, из-за чего практически не наблюдается перемещение (откат) лесовозного автомобиля (расстояние отката приблизительно равно перемещению с продольной скоростью за то же время).

В начале процессов удлинения и сокращения дышла сцепного устройства происходит резкое увеличение скорости $v_{\text{трac.}}$ лесовозного автомобиля или прицепа (рис. 11, а, б). Это обусловлено тем, что в модели изменение длины $L_{\text{сoуп.}}$ дышла производится по линейному закону, и это вызывает высокие ускорения при трогании с места лесовозного автомобиля или прицепа. Из-за этого же наблюдаются пики большой амплитуды на зависимости от времени продольной силы $F_{\text{сoуп.}}$ на дышле сцепного устройства (рис. 11, в).

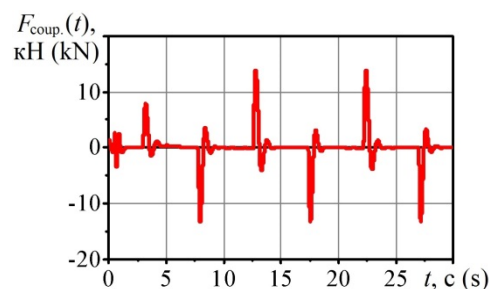
Компьютерный эксперимент продолжался не менее пяти циклов удлинения-сокращения дышла сцепного устройства, чтобы колеса лесовозного тягача с прицепом переместились по лесовозной дороге с различными геометрическими параметрами неровностей, что позволяет обеспечить достаточно качественное усреднение показателей эффективности, рассчитываемых после окончания компьютерного эксперимента. Наиболее важными факторами, влияющими на процесс самовытаскивания, являются геометрические параметры неровностей лесовозной дороги, так как именно состояние опорной поверхности приводит к затруднению движения лесовозного автопоезда и необходимости самовытаскивания. Разработанная модель позволяет изменять глубину $h_{\text{холл.}}$ неровностей лесовозной дороги и воспроизводить движение лесовозного тягача с прицепом по данному рельефу (рис. 12). Для исследования влияния глубины $h_{\text{холл.}}$ неровностей опорной поверхности проведены шесть компьютерных экспериментов, в которых $h_{\text{холл.}}$ изменялась от 0 до 0,5 м с шагом 0,1 м. При этом выдерживался



а / а



б / б



в / в

Рисунок 11. Зависимости от времени t продольной скорости тягача $v_{\text{трac.}}$ (а) и прицепа $v_{\text{трaил.}}$ (б) и силы, возникающей на сцепном устройстве $F_{\text{сoуп.}}$ (в)

Figure 11. Dependences on time t of the longitudinal speed of the tractor $v_{\text{трac.}}$ (а) and trailer $v_{\text{трaил.}}$ (б) and the force generated on the coupler $F_{\text{сoуп.}}$ (в)

Источник: собственные вычисления авторов
Source: authors' own calculations

постоянным коэффициентом вязкого трения колес $k_{\text{visc.}}$ о поверхность в продольном направлении $k_{\text{vis.}} = 10$ кН·с/м, имитирующий взаимодействие колес с верхними слоями лесовозной дороги, находящихся в полужидком вязком состоянии. Величина хода дышла сцепного устройства в процессе выполнения этих компьютерных экспериментов принималась – 0,55 м, а скорость удлинения-сокращения дышла сцепного устройства составляла – 0,28 м/с.

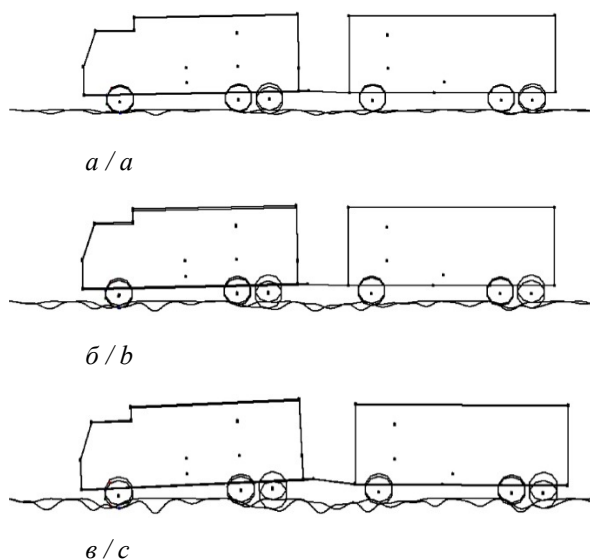


Рисунок 12. Состояние опорной поверхности и автопоезда при различных значениях средней глубины h_{depr} неровностей опорной поверхности: $a - h_{\text{depr}} = 0,2$ м; $b - h_{\text{depr}} = 0,4$ м; $c - h_{\text{depr}} = 0,6$ м

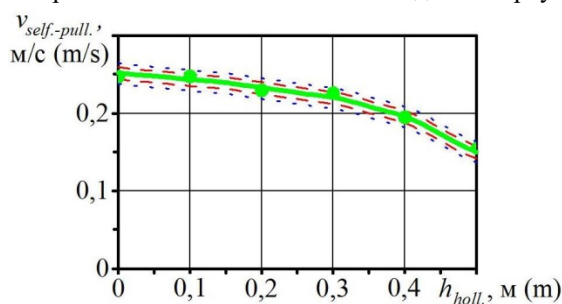
Figure 12. Condition of the supporting surface and road train at different values of the mean depth h_{depr} depressions of the supporting surface: $a - h_{\text{depr}} = 0.2$ m; $b - h_{\text{depr}} = 0.4$ m; $c - h_{\text{depr}} = 0.6$ m

Источник: собственная схема авторов

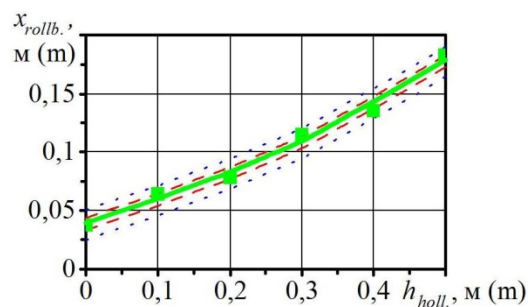
Source: authors' own schema

С увеличением глубины неровностей h_{holl} затрудняется самовытаскивание лесовозного автопоезда, что приводит к ухудшению показателей эффективности процесса самовытаскивания $v_{\text{self-pull}}$, x_{rollb} , N_{cons} (рис. 13). Однако при средней глубине h_{holl} неровностей опорной поверхности менее 0,3 м показатели эффективности процесса самовытаскивания составляют приемлемые величины: скорость самовытаскивания $v_{\text{self-pull}}$ более 0,22 м/с (рис. 13, а), величина перемещения (отката) x_{rollb} за цикл удлинения-сокращения дышла сцепного устройства менее 0,12 м (рис. 13, б), потребляемая пневмогидравлическим дышлом сцепного устройства мощность N_{cons} менее 1,9 кВт (рис. 13, в). При очень сложных дорожных условиях – средней глубине h_{holl} неровностей от 0,3 до 0,5 м – самовытаскивание лесовозного автопоезда происходит, но показатели эффективности снижаются: скорость самовытаскивания $v_{\text{self-pull}}$ снижается до 0,16 м/с, перемещение (откат) x_{rollb} увеличивается до 0,17 м, потребляемая мощность N_{cons} увеличивается до 3,1 кВт (рис. 13).

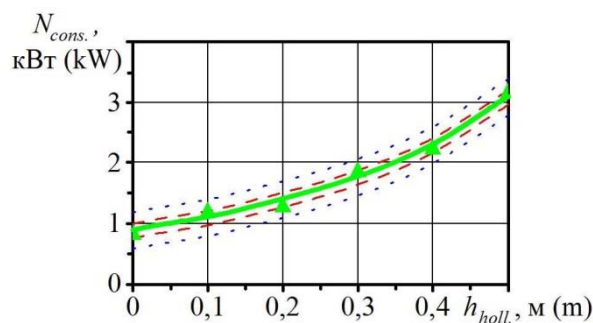
Для изучения влияния коэффициента k_{visc} вязкого трения колес лесовозного автопоезда об опорную



a / a



b / b



c / c

Рисунок 13. Влияние средней глубины h_{holl} неровностей опорной поверхности на среднюю скорость самовытаскивания $v_{\text{self-pull}}$ (а), величину отката назад автопоезда x_{rollb} (б) и потребляемую рекуперативным дышлом мощность N_{cons} (в)

Figure 13. Influence of average h_{holl} depth cavities of the supporting surface to the average speed of self-pulling $v_{\text{self-pull}}$ (a), the rollback value of the road train x_{rollb} (b) and the power consumed by the regenerative drawbar N_{cons} (c)

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

поверхность лесовозной дороги выполнена серия компьютерных экспериментов, при осуществлении которых варьировали коэффициент k_{visc} вязкого трения колес

на уровнях 0, 5, 10, 15, 20 кН·с/м. Этот диапазон позволяет перекрыть возможные на практике состояния поверхности лесовозной дороги: от сухой (0 кН·с/м) до существенно вязкой опорной поверхности лесовозной дороги (20 кН·с/м). При этом средняя глубина h_{holl} неровностей лесовозной дороги была постоянной и составляла 0,3 м (рис. 14).

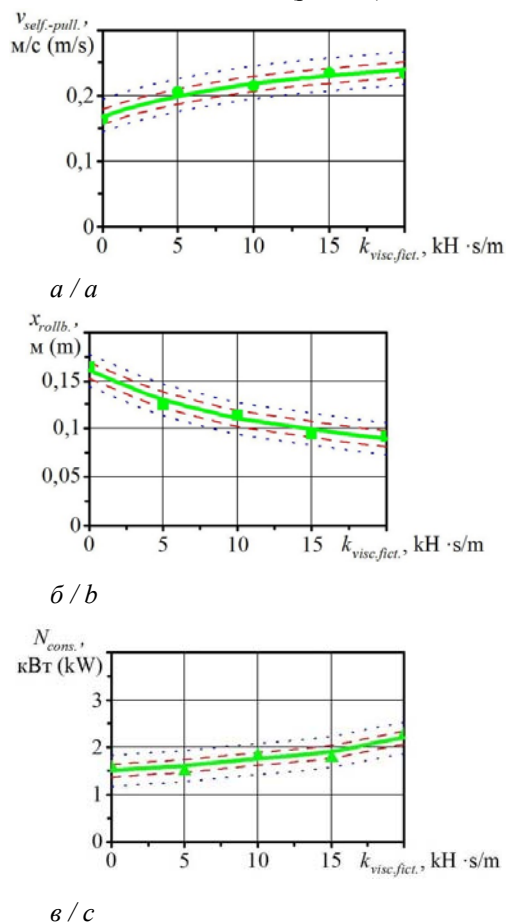


Рисунок 14. Влияние коэффициента вязкого трения $k_{\text{visc.}}$ колес автопоезда об опорную поверхность на среднюю скорость самовытаскивания $v_{\text{self-pull.}}$ (а), величину отката назад автопоезда $x_{\text{rollb.}}$ (б) и потребляемую рекуперативным дышлом мощность $N_{\text{cons.}}$ (в)

Figure 14. Influence of the coefficient of viscous friction $k_{\text{visc.}}$ of the wheels of the road train on the supporting surface to the average speed of self-pulling $v_{\text{self-pull.}}$ (a), the rollback value of the road train $x_{\text{rollb.}}$ (b) and the power consumed by the regenerative drawbar $N_{\text{cons.}}$ (c)

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

Выявлено, что при изменении в широких пределах коэффициента $k_{\text{visc.}}$ вязкого трения колес лесовозного автопоезда об опорную поверхность лесовозной дороги, рекуперативное пневмогидравлическое дышло сцепного устройства обеспечивает достаточно эффективное самовытаскивание со скоростью $v_{\text{self-pull.}}$ от 0,17 до 2,3 м/с, величиной перемещения (отката) $x_{\text{rollb.}}$ от 0,09 до 0,16 м, потребляемой мощностью $N_{\text{cons.}}$ от 1,5 до 2,2 кВт (рис. 14).

возного автопоезда об опорную поверхность лесовозной дороги, рекуперативное пневмогидравлическое дышло сцепного устройства обеспечивает достаточно эффективное самовытаскивание со скоростью $v_{\text{self-pull.}}$ от 0,17 до 2,3 м/с, величиной перемещения (отката) $x_{\text{rollb.}}$ от 0,09 до 0,16 м, потребляемой мощностью $N_{\text{cons.}}$ от 1,5 до 2,2 кВт (рис. 14).

Выводы

На основании проведенного поискового исследования выявлены наиболее значимые факторы, от которых зависит изменение транспортных расходов, затрачиваемых лесозаготовительными предприятиями на процесс доставки лесоматериалов потребителям лесовозным автомобильным транспортом. Для сокращения таких расходов, предложена перспективная конструкция дышла сцепного устройства лесовозного автопоезда, обеспечивающая эффект самовытаскивания автопоезда, генерирование и накопление энергии рабочей жидкости, с последующим ее использованием в технологическом гидравлическом оборудовании.

Для имитационного моделирования движения лесовозного автопоезда, оснащенного предлагаемым дышлом сцепного устройства, и работы дышла отдельно в режимах самовытаскивания, рекуперации и демпфирования динамических нагрузок разработаны две компьютерные программы. Первая – «Программа для моделирования работы дышла сцепного устройства автопоезда в режиме рекуперации энергии». Вторая – «Программа для моделирования процесса самовытаскивания лесовозного автопоезда дышлом сцепного устройства».

Установлено, что с увеличением глубины неровностей на лесовозной дороге затрудняется самовытаскивание лесовозного автопоезда, что приводит к ухудшению показателей эффективности процесса самовытаскивания. Однако при средней глубине неровностей опорной поверхности менее 0,3 м показатели эффективности процесса самовытаскивания составляют приемлемые величины: скорость самовытаскивания более 0,22 м/с, величина перемещения (отката) за цикл удлинения-сокращения дышла сцепного устройства менее 0,12 м, потребляемая пневмогидравлическим дышлом сцепного устройства мощность менее 1,9 кВт. При очень сложных дорожных условиях – средней глубине неровностей от 0,3 до 0,5 м – самовытаскивание лесовозного автопоезда также происходит,

но показатели эффективности снижаются: скорость самовытаскивания снижается до 0,16 м/с, перемещение (откат) увеличивается до 0,17 м, потребляемая мощность увеличивается до 3,1 кВт.

Выявлено, что при изменении в широких пределах коэффициента вязкого трения колес лесовоз-

ного автопоезда об опорную поверхность лесовозной дороги, рекуперативное пневмогидравлическое дышло сцепного устройства обеспечивает достаточно эффективное самовытаскивание со скоростью самовытаскивания от 0,17 до 2,3 м/с, величиной перемещения (отката) от 0,09 до 0,16 м, потребляемой мощностью от 1,5 до 2,2 кВт.

Список литературы

1. Никонов, В. О. Оптимизация конструктивных параметров рекуперативного сцепного устройства, установленного в лесовозном автомобиле с прицепом / В. О. Никонов, В. И. Посметьев, В. А. Зеликов, В. В. Посметьев, А. С. Чуйков // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 1 (49). – С. 162-179. – Библиогр. : с. 176-178 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/11>
2. Matijosius J. Research Determining the Priority Order of Forces Acting on a Vehicle Transporting Logs / J. Matijosius, K. Ciziuniene, J. Liebuviene, E. Sokolovskij // Appl. Sci. 2023, 13, 6174. – Библиогр. : pp. 13-15 (43 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/app13106174>
3. Li H. A Fast Instance Segmentation Technique for Log End Faces Based on Metric Learning / H. Li, J. Liu, D. Wang // Forests 2023, 14, 795. – Библиогр. : pp. 12-13 (30 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/f14040795>
4. Moskalik T. Methods of Wood Volume Determining and Its Implications for Forest Transport / T. Moskalik, L. Temendorf, J. V. D. Saar, G. Trzcinski // Sensors 2022, 22, 6028. – Библиогр. : pp. 14-17 (67 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/s22166028>
5. Akay A. E. Integrated Planning of Timber Extraction and Hauling Activities by using Network 2000 Program / A. E. Akay, N. Sesen // Eur J Forest Eng 2021, 7(2) : 77-91. – Библиогр. : pp. 91 (10 titles). – DOI: <https://doi.org/10.33904/ejfe.1038669>
6. Zemanek T. Operating Characteristics of a Timber Trailer with a Hybrid Drive / T. Zemanek, P. Prochazka, I. Pazdera, J. Neruda, V. Mergl, O. Vitek, R. Ulrich, L. Stanek // Forests 2022, 13, 1317. – Библиогр. : pp. 14-15 (26 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/f13081317>
7. Skvor P. The Effect of Different Road Types on Timber Truck Drivers by Assessing the Load Environment of Drivers by Monitoring Changes in Muscle Tension / P. Skvor, M. Jankovsky, P. Natov, J. Dvorak, K. Zlatushka // Forests 2022, 13, 1565. – Библиогр. : pp. 15-17 (55 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/f13101565>
8. Karha K. Fuel consumption of a high-capacity transport (HCT) vehicle combination for industrial roundwood hauling: a case study of laden timber truck combinations in Finland / K. Karha, E. Kortelainen, A. Karjalainen, H. Haavikko, T. Palander // International Journal of Forest Engineering 2023, Vol. 34, Issue 2, 10 p. – Библиогр. : pp. 9-10 (55 titles). – DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2022.2163871>
9. Andini S. The Effect of Road Conditions on Acacia mangium Timber Hauling Performance / S. Andini // Jurnal Ilmu Kehutanan 2023, Vol. 17 № 1 pp. 45-55. – Библиогр. : pp. 54-55 (40 titles). – DOI: <https://doi.org/10.22146/jik.v17i1.5288>
10. Trzcinski G. Axle Load of Round Wood Transport Vehicles in Relation to Wood Assortment / G. Trzcinski, L. Tymendorf // Environ. Sci. Proc. 2022, 22, 12. – DOI: <https://doi.org/10.3390/IECF2022-13043>
11. Smidt M. F. The Potential for Effective Training of Logging Truck Drivers / M. F. Smidt, D. Mitchell, K. K. Logan // Journal of Agricultural Safety and Health, 2021 27 (1) : 29-41. – Библиогр. : pp. 37-41 (90 titles). – DOI: <https://doi.org/10.13031/jash.14084>
12. Du X. Analysis of Operating Safety of Tractor-Trailer under Crosswind in Cold Mountainous Areas / X. Du, G. Wang // Appl. Sci. 2022, 12, 12755. – Библиогр. : pp. 16-17 (29 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/app122412755>
13. Audy J.-F. Planning methods and decision support systems in vehicle routing problems for timber transportation: a review / J.-F. Audy, M. Ronnqvist, S. D. Amors, A.-D. Yahiaoui // International Journal of Forest

Engineering, 2023, Vol. 34, № 2, 143-167. – Bibliogr. : pp. 160-163 (122 titles). – DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2022.2142367>

14. Anttila P. Effect of vehicle properties and driving environment on fuel consumption and CO₂ emissions of timber trucking based on data from fleet management system / P. Anttila, T. Nummelin, K. Vaatainen, J. Laitila, J. Alalilomaki, A. Kilpelainen // Transportation Research Interdisciplinary Perspectives 15 (2022) 100671. – Bibliogr. : pp. 15 (32 titles). – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trip.2022.100671>

15. Liimatainen H. Impacts of increasing maximum truck weight – case Finland / H. Liimatainen, M. Pollanen, L. Nykanen // Liimatainen et al. European Transport Research Review (2020) 12 : 14. – Bibliogr. : pp. 11-12 (43 titles). – DOI: <https://doi.org/10.1186/s12544-020-00403-z>

16. Katreddi S. Trip Based Modeling of Fuel Consumption in Modern Heavy-Duty Vehicles Using Artificial Intelligence / S. Katreddi, A. Thiruvengadam // Energies 2021, 14, 8592. – Bibliogr. : pp. 10-12 (46 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/en14248592>

17. Посметьев, В. И. Компьютерное моделирование рекуперативного тягово-сцепного устройства лесовозного автомобиля с прицепом / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев // Лесной журнал. 2019, № 4. – С. 108-123. – Библиогр. : с. 120-123 (20 назв.). – DOI: <http://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.4.108>

18. Патент № 2784227 Российская Федерация, МПК В60D 1/14. Рекуперативное пневмогидравлическое дышло сцепного устройства автопоезда с функцией самовытаскивания : № 2022124514 : заявл. 16.09.2022 : опубл. 23.11.2022 / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев, И. В. Сизьмин ; заявитель ФГБОУ ВО ВГЛТУ имени Г. Ф. Морозова.

19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023618813 Российская Федерация. Программа для моделирования работы рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства автопоезда с функцией самовытаскивания : № 2023618040 : заявл. 29.04.2023 : опубл. 29.04.2023 / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, И. В. Сизьмин, В. В. Посметьев ; заявитель ФГБОУ ВО ВГЛТУ имени Г. Ф. Морозова.

20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023618814 Российская Федерация. Программа для моделирования движения автопоезда с функцией самовытаскивания : № 2023618041 : заявл. 29.04.2023 : опубл. 29.04.2023 / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, И. В. Сизьмин, В. В. Посметьев ; заявитель ФГБОУ ВО ВГЛТУ имени Г. Ф. Морозова.

References

1. Nikonov V. O., Posmetev V. I., Zelikov V. V., Posmetev V. V., Chuikov A. S. *Optimizaciya konstruktivnih parametrov rekuperativnogo scepного ustroystva, ustanovlennogo v lesovoznom avtomobile s pricepom* [Optimization of the design parameters of the regenerative hitch installed in a logging vehicle with a trailer]. Forestry journal. – 2023. – Т. 13. – № 1 (49). – С. 162-179. DOI: <http://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.1/11>. (In Russ.).

2. Matijosius J., Ciziuniene K., Liebuviene J., Sokolovskij E. Research Determining the Priority Order of Forces Acting on a Vehicle Transporting Logs. Appl. Sci. 2023, 13, 6174. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13106174>

3. Li H., Liu J., Wang D. Fast Instance Segmentation Technique for Log End Faces Based on Metric Learning. Forests 2023, 14, 795. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14040795>

4. Moskalik, L. Temendorf, J. V. D. Saar, G. Trzcinski Methods of Wood Volume Determining and Its Implications for Forest Transport. Sensors 2022, 22, 6028. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22166028>

5. Akay A. E., Sesen N. Integrated Planning of Timber Extraction and Hauling Activities by using Network 2000 Program. Eur J Forest Eng 2021, 7(2) : 77-91. DOI: <https://doi.org/10.33904/ejfe.1038669>

6. Zemanek T., Prochazka P., Pazdera I., Neruda J., Mergl V., Vitek O., Ulrich R., Stanek L. Operating Characteristics of a Timber Trailer with a Hybrid Drive. Forests 2022, 13, 1317. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13081317>

7. Skvor P., Jankovsky M., Natov P., Dvorak J., Zlatushka K. The Effect of Different Road Types on Timber Truck Drivers by Assessing the Load Environment of Drivers by Monitoring Changes in Muscle Tension. Forests 2022, 13, 1565. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13101565>

8. Karha K., Kortelainen E., Karjalainen A., Haavikko H., Palander T. Fuel consumption of a high-capacity transport (HCT) vehicle combination for industrial roundwood hauling: a case study of laden timber truck combinations in Finland. *International Journal of Forest Engineering* 2023, Vol. 34, Issue 2, 10 p. DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2022.2163871>
9. Andini S. The Effect of Road Conditions on Acacia mangium Timber Hauling Performance. *Jurnal Ilmu Kehutanan* 2023, Vol. 17 № 1 pp. 45-55. DOI: <https://doi.org/10.22146/jik.v17i1.5288>
10. Trzeinski G., Tymendorf L. Axle Load of Round Wood Transport Vehicles in Relation to Wood Assortment. *Environ. Sci. Proc.* 2022, 22, 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/IECF2022-13043>
11. Smidt M. F., Mitchell D., Logan K. K. The Potential for Effective Training of Logging Truck Drivers. *Journal of Agricultural Safety and Health*, 2021 27 (1) : 29-41. DOI: <https://doi.org/10.13031/jash.14084>
12. Du X., Wang G. Analysis of Operating Safety of Tractor-Trailer under Crosswind in Cold Mountainous Areas. *Appl. Sci.* 2022, 12, 12755. DOI: <https://doi.org/10.3390/app122412755>
13. Audy J.-F., Ronnqvist M., Amors S. D., Yahiaoui A.-D. Planning methods and decision support systems in vehicle routing problems for timber transportation: a review. *International Journal of Forest Engineering*, 2023, Vol. 34, №. 2, 143-167. DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2022.2142367>
14. Anttila P., Nummelin T., Vaatainen K., Laitila J., Ala-Ilomaki J., Kilpelainen A. Effect of vehicle properties and driving environment on fuel consumption and CO₂ emissions of timber trucking based on data from fleet management system. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives* 15 (2022) 100671. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trip.2022.100671>
15. Liimatainen H., Pollanen M., Nykanen L. Impacts of increasing maximum truck weight – case Finland. *Liimatainen et al. European Transport Research Review* (2020) 12 : 14. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12544-020-00403-z>
16. Katreddi S., Thiruvengadam A. Trip Based Modeling of Fuel Consumption in Modern Heavy-Duty Vehicles Using Artificial Intelligence. *Energies* 2021, 14, 8592. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14248592>
17. Posmetev V. I., Nikonov V. O., Posmetev V. V. Computer Simulation of the Recuperative Towing Coupler of a Forest Truck with a Trailer // *Lesnoy Zhurnal* (Russian forestry journal), 2019, № 4. – pp. 108-123. DOI: <http://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.4.108>
18. Posmetev V. I., e. a. *Rekuperativnoe pnevmogidravlichesкое dishlo s cepnogo ustroistva avtopoezda s funkciei samovitaskivaniya* [Recuperative pneumohydraulic drawbar of a road train hitch with self-pulling function]. Patent RF, no 2784227, 2022.
19. Posmetev V. I., e. a. *Programma dlya modelirovaniya raboti rekuperativnogo pnevmogidravlichesкого dishla s cepnogo ustroistva avtopoezda s funkciei samovitaskivaniya* [Program for modeling the operation of a recuperative pneumohydraulic drawbar of a road train coupling device with a self-pulling function]. Certificate of state registration of the computer program RF, no 2023618813, 2023.
20. Posmetev V. I., e. a. *Programma dlya modelirovaniya dvizheniya avtopoezda s funkciei samovitaskivaniya* [A program for simulating the movement of a road train with a self-pulling function]. Certificate of state registration of the computer program RF, no 2023618814, 2023.

Сведения об авторах

✉ *Никонов Вадим Олегович* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7380-9180>, e-mail: 8888nike8888@mail.ru.

Посметьев Валерий Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машиностроительных технологий, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9878-7451>, e-mail: posmetyev@mail.ru.

Сизьмин Игорь Валерьевич – аспирант кафедры машиностроительных технологий ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9035-515X>, e-mail: igorsizmin96@gmail.com.

Посметьев Виктор Валерьевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6622-5358>, e-mail: victorvpo@mail.ru.

Зеликов Владимир Анатольевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой организации перевозок и безопасности движения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2317-9413>, e-mail: zelikov-vrn@mail.ru.

Мозговой Николай Васильевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры техносферной и пожарной безопасности ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», ул. 20-летия Октября, д. 84, г. Воронеж, Российская Федерация, 394006, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9835-1824>, e-mail: nv_moz@mail.ru.

Колодий Петр Владимирович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры лесохозяйственных дисциплин Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины, ул. Мазурова – 59/34, г. Гомель, Республика Беларусь, 246053, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6418-1531>, e-mail: pkolody@mail.ru.

Information about the authors

✉ *Nikonov Vadim Olegovich* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Production, Repair and Operation of Machines, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, st. Timiryazeva, 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7380-9180>, e-mail: 8888nike8888@mail.ru.

Posmetev Valerii Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, st. Timiryazeva, 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9878-7451>, e-mail: posmetyev@mail.ru.

Sizmin Igor Valerevich – The Post-Graduate Student of Mechanical Engineering Technologies, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, st. Timiryazeva, 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9035-515X>, e-mail: igorsizmin96@gmail.com.

Posmetev Viktor Valerevich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6622-5358>, e-mail: victorvpo@mail.ru.

Zelikov Vladimir Anatolyevich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Organization of Transportation and Traffic Safety, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2317-9413>, e-mail: zelikov-vrn@mail.ru.

Mozgovoy Nikolay Vasilyevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technosphere and Fire Safety, Voronezh State Technical University, Voronezh, ul. 20-letiya Oktyabrya, 84, Voronezh, Russian Federation, 394006, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9835-1824>, e-mail: nv_moz@mail.ru.

Kolodiy Petr Vladimirovich – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Forestry Disciplines, Gomel State University named after F. Skorina, st. Mazurova – 59/34, Gomel, Republic of Belarus, 246053, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6418-1531>, e-mail: pkolody@mail.ru.

✉ – Для контактов/Corresponding author


Оригинальная статья


DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/7>

УДК 630.232 : (004.652.4 + 303.722.4)



Справочная информационная система FLR-Library для адаптивного лесовосстановления: информационная модель

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>

Виктор И. Лисицын, viktor-lisicyn@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-2148-1988>

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

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

Процесс восстановления лесных ландшафтов в условиях глобальной урбанизации и вырубке реликтовых насаждений, а также изменения климата является сложным и важным для изучения, планирования этапов и технологических операций для прогнозирования виталитета и прироста древостоя. Для решения данной задачи разрабатывается справочная информационная система для адаптивного лесовосстановления. Проведено моделирование и описание процесса адаптивного лесовосстановления с помощью функциональных диаграмм, построенных по методологии IDEF0, подробно приведено описание стрелок контекстной диаграммы с пояснениями процессов. Для детального анализа предметной области и моделирования процесса адаптивного лесовосстановления произведена декомпозиция контекстной диаграммы на диаграмму A1, которая показывает реализацию процесса выбора операций восстановления лесного ландшафта с точки зрения технологии и технических средств. Диаграмма A2 рассматривает технологию адаптивного лесовосстановления с точки зрения нескольких лесохозяйственных дескрипторов, что обеспечивает учет специфики отрасли. В результате моделирования были получены диаграммы A0, A1, A2, которые показывают структурированное изображение функций системы, информации и объектов, связывающих эти функции.

Ключевые слова: восстановление лесных ландшафтов, адаптивное лесовосстановление, справочная система, FLR-Library, информационная модель, методология IDEF0.

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: Справочная информационная система FLR-Library для адаптивного лесовосстановления: информационная модель / Т. П. Новикова, А. И. Новиков, В. И. Лисицын, Е. П. Петрищев // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 4 (52). – Ч. 1. – С. 114–124. – Библиогр.: с. 121–123 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/7>.


Поступила 21.08.2023. Пересмотрена 11.12.2023. Принята 11.12.2023. Опубликована онлайн 29.12.2023.

FLR-Library reference information system for adaptive forest restoration: the information model

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>

Viktor I. Lisitsyn, viktor-lisicyn@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-2148-1988>

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

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

Abstract

The process of restoring forest landscapes in the context of global urbanization and deforestation of relict stands, as well as climate change, is complex and important for studying, planning stages and technological operations and predicting the results of vitality and growth of stands. To solve this problem, a reference information system for adaptive reforestation is being developed. In this paper, the modeling and description of the adaptive reforestation process is carried out using functional diagrams constructed using the IDEF0 methodology, and the description of the arrows of the context diagram with explanations of the processes is given in detail. For a detailed analysis of the subject area and modeling of the adaptive reforestation process, we decomposed the context diagram into diagram A1, which shows the implementation of the process of choosing a technology for the restoration of the forest landscape from the point of view of technology and technical means, and diagram A2, which examines the restoration technology from the point of view of several forestry descriptors, which takes into account the specifics of the industry. As a result of the simulation, diagrams A0, A1, A2 were obtained, which show a structured image of the system functions, information and objects connecting these functions.

Keywords: forest landscape restoration, FLR, adaptive reforestation, reference system, information model, methodology IDEF0.

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., Lisitsyn V.I., Petrishchev E.P. (2023). FLR-Library reference information system for adaptive forest restoration: the information model. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 4 (52), pp. 114-124 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/7>.

Received 21.08.2023. **Revised** 11.12.2023. **Accepted** 11.12.2023. **Published online** 29.12.2023.

Введение

В рамках проекта «Разработка справочной информационной системы для адаптивного восстановления лесных ландшафтов (FLR-Library)» [1] в первый год были поставлены следующие задачи: создать набор данных лесохозяйственных терминов и

провести анализ дескрипторов «лес», «лесные ландшафты», «адаптивное лесовосстановление» и т.д. [2], в том числе провести кластерный анализ сходства и различия дескрипторов [2,3], а также разработать модель справочной информационной системы (СИС).

Модель справочной информационной системы должна отражать предметную область [4,5] и базироваться на алгоритме управления, который учитывает современные тенденции при восстановлении лесных ландшафтов [6,7], такие, как оценка качества семян и неразрушающий контроль качества семян [17,20], обработка лесных семян сосны обыкновенной (в том числе, сепарирование по цветосеменным расам, капсулирование и дражжирование семян) [15,17,19], влияния климатических изменений на саженцы с ЗКС [18], применения технологии и технических средств для высева дражжированных семян с БПЛА [16]. Так как в дальнейшем планируется применение справочной информационной системы для адаптивного восстановления лесных ландшафтов с целью поддержки принятия управленческих решений по выбору технологии восстановления при реализации проектов адаптивного восстановления лесных ландшафтов, то необходимо подключение баз данных по дескрипторам для учета характеристик предметной области, и баз данных других переменных, отражающих техническую, технологическую, адаптивную, природно-климатическую компоненты процесса восстановления лесных ландшафтов. Все это должно быть учтено на этапе моделирования СИС.

Обзор программного обеспечения показал, что широко представлены информационные системы управления (ИСУ) для ремонта и технического обслуживания лесных машин [8], уделяется большое внимание единому информационному пространству и качеству передачи данных, информационному управлению парком лесных машин [9]. Существующее программное обеспечение для лесного комплекса [10-14] разрабатывалось с целью автоматизации работы с отчетной документацией, отслеживания технических характеристик машин и оборудования для планирования технического обслуживания, либо выявления причин поломок; для сбора данных о затратах времени на отдельные операции, затратах ГСМ, трудозатратах и т.п. для прогнозирования времени и объема заготовки леса. Необходимо отметить, что существующие информационные системы связаны с процессами заготовки и переработки древесины, и практически не касаются процесса лесовосстановления (лишь в части оценки

технического состояния лесных машин). Однако процесс восстановления лесных ландшафтов в условиях глобальной урбанизации и вырубке реликтовых насаждений, а также изменения климата является сложным и важным для изучения, планирования этапов и технологических операций и прогнозирования результатов виталитета и прироста древостоя. Модель СИС ляжет в основу справочной информационной системы для адаптивного восстановления лесных ландшафтов (FLR-Library), которая обеспечит поддержку принятия решения по выбору технологии восстановления, набору машин и оборудования.

Материалы и методы

Объект исследования

Процессы восстановления лесных ландшафтов, под которым понимаем лесовосстановление, лесоразведение, содействие естественному лесовосстановлению.

Предмет исследований – композиция и декомпозиция технологических операций указанного процесса восстановления лесных ландшафтов.

Сбор и анализ данных

Моделирование и описание процесса адаптивного лесовосстановления было выполнено с помощью функциональных диаграмм, построенных по методологии IDEF0. Модель рассматриваемого процесса представляет собой совокупность иерархически связанных диаграмм, вершиной которой является контекстная диаграмма. Контекстная диаграмма состоит из единственного объекта – «Выбор технологии восстановления лесного ландшафта» и показывает его взаимодействие с внешней средой путем отображения входных и выходных данных, управляющей информации и механизма выполнения. Диаграммы декомпозиции описывают родительскую диаграмму, содержат несколько дочерних работ и стрелки взаимодействия.

Моделирование процессов было выполнено в Microsoft Visio Drawing в разделе Схема IDEF0. Методология IDEF0 предназначена для функционального моделирования, т.е. моделирования выполнения функций объекта путем создания описательной графической модели.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлена контекстная диаграмма, которая состоит из единственного объекта – «Выбор технологии восстановления лесного ландшафта» и показывает его взаимодействие с внешней средой путем отображения входных и выходных данных, управляющей информации и механизма выполнения. Описание контекстной диаграммы дано в табл. 1.

Для детального анализа предметной области и моделирования процесса адаптивного лесовосстановления произвели декомпозицию контекстной

диаграммы на диаграмму А1 (рисунок 2), которая показывает реализацию процесса выбора технологии восстановления лесного ландшафта с точки зрения технологии и технических средств и диаграмму А2 (рисунок 3), которая рассматривает технологию восстановления лесных ландшафтов с точки зрения лесовосстановления, лесоразведения и содействия естественному лесовосстановлению. Подробное рассмотрение декомпозиций А1.1, А1.2, ..., А1.5 и А2.1, А2.2, А2.3 планируется в будущих работах, так как объем данных по диаграммам не соотносим с объемом статьи.

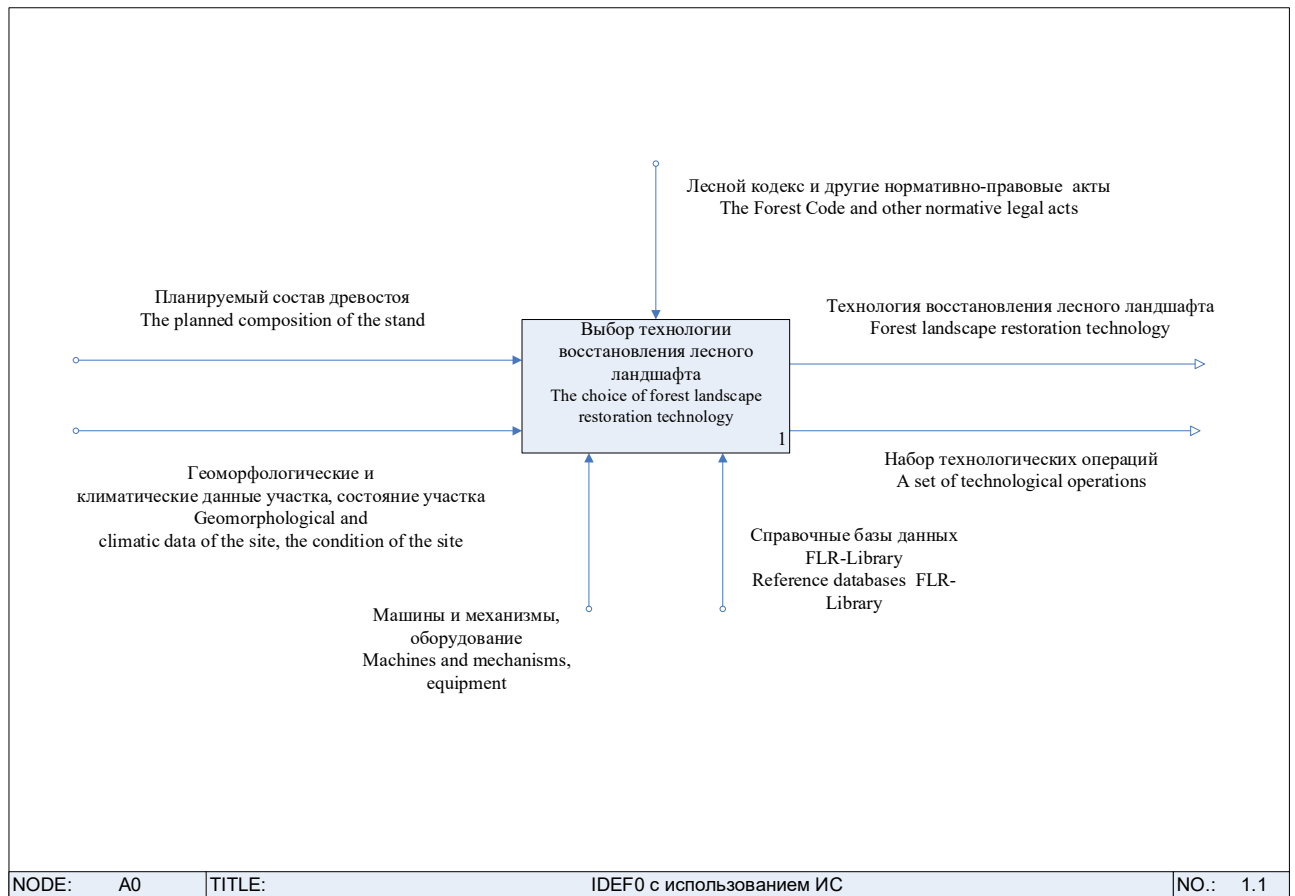


Рисунок 1. Контекстная диаграмма IDEF0 для справочной информационной системы для адаптивного восстановления лесных ландшафтов (FLR-Library)

Figure 1. IDEF0 context diagram for a reference information system for adaptive forest landscape restoration (FLR-Library)

Источник: собственные результаты авторов

Source: own results

Описание стрелок контекстной диаграммы

Table 1

Description of the context diagram arrows	
Имя стрелки Arrow Name	Определение стрелки Arrow Definition
Планируемый состав древостоя (вход) The planned composition of the stand (Input)	Состав планируемого древостоя определяет ряд входных переменных и устанавливает ряд требований к характеристике почвы, лесосеменному материалу и его подготовке, к лесным машинам и отдельным технологическим операциям. The composition of the planned stand determines a number of input variables and establishes a number of requirements for soil characteristics, seed material and its preparation, for forestry machines and individual technological operations
Геоморфологические и климатические данные участка, состояние участка (вход) Geomorphological and climatic data of the site, the condition of the site (Input)	Определяет ряд входных переменных: состав и физико-механические свойства почвогрунтов (влияет на выбор машин и оборудования, учитывается при выборе времени посадки(посева) лесосеменного материала); геоморфологические характеристики участка: уклон, рельеф, высота над уровнем моря, площадь, форма участка (влияют на выбор машин и оборудования и технологических операций); состояние участка (будем понимать: 1) после пожара, 2) рубок, 3) ранее лес не произрастал. Determines a number of input variables: composition and physico-mechanical properties of soils (affects the choice of machinery and equipment, is taken into account when choosing the time of planting (sowing) of seed material); geomorphological characteristics of the site: slope, relief, height above sea level, area, shape of the site (affect the choice of machinery and equipment and technological operations); condition of the site (we will understand: 1) after the fire, 2) logging, 3) previously, the forest did not grow.
Лесной кодекс и другие нормативно-правовые акты (управление) The Forest Code and other normative legal acts e (Control)	Глобально на систему влияет Лесной кодекс РФ, определяя границы участка и права лесопользования. Globally, the system is influenced by the Forest Code of the Russian Federation, defining the boundaries of the site and the rights of forest use.
Машины и механизмы, оборудование (механизм) Machines and mechanisms, equipment (Mechanism)	Лесные машины, механизмы и оборудование необходимые для реализации любой выбранной технологии восстановления лесных ландшафтов. Forest machines, mechanisms and equipment necessary for the implementation of any chosen technology for the restoration of forest landscapes.
Справочные базы данных FLR-Library (механизм) Reference databases FLR-Library (Mechanism)	Справочные базы данных, которые содержат информацию о международной терминологии, характеристики лесных машин, почвогрунтов, климата и др. Reference databases that contain information on international terminology, characteristics of forest machines, soils, climate, etc.
Технология восстановления лесного ландшафта (выход) Forest landscape restoration technology (Output)	Информация, характеризующая выбор технологии восстановления лесного ландшафта согласно входным данным (вход) и ресурсам (механизм). Information characterizing the choice of forest landscape restoration technology according to input data (input) and resources (mechanism).
Набор технологических операций (выход) A set of technological operations (Output)	Информация, характеризующая выбор конкретных операций в рамках рекомендованной технологии. Information describing the choice of specific operations within the recommended technology.

Источник: собственные результаты авторов

Source: own results

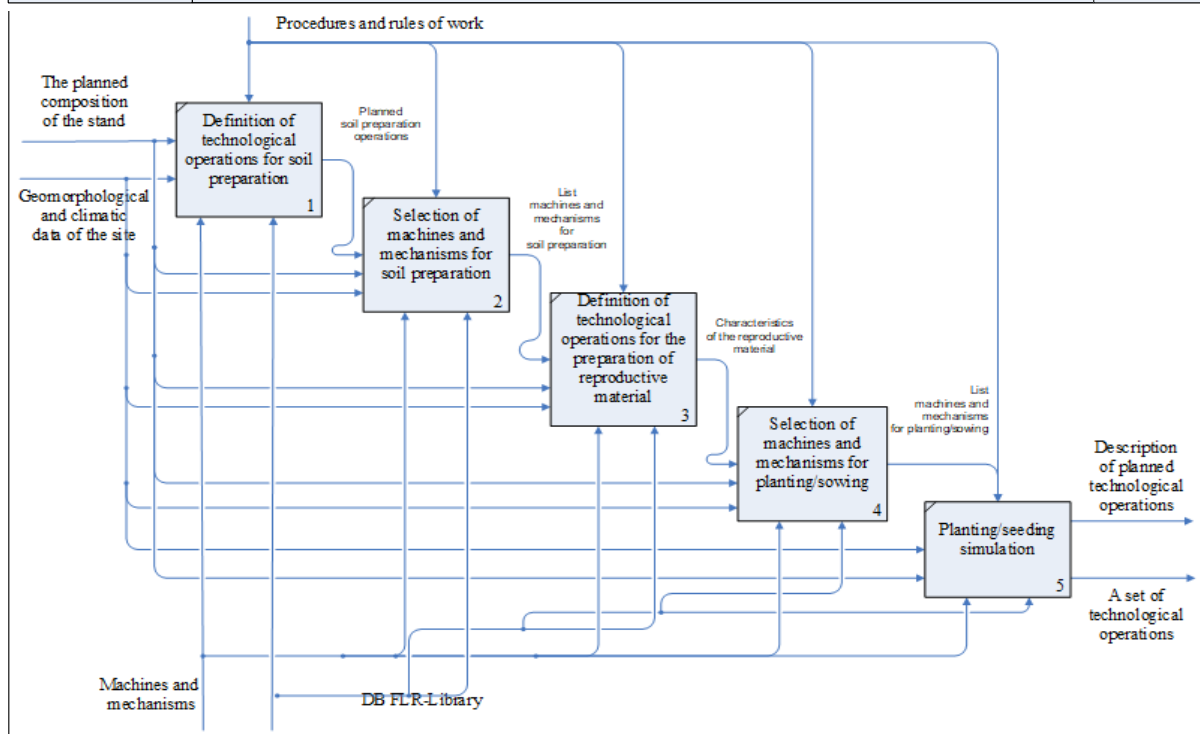
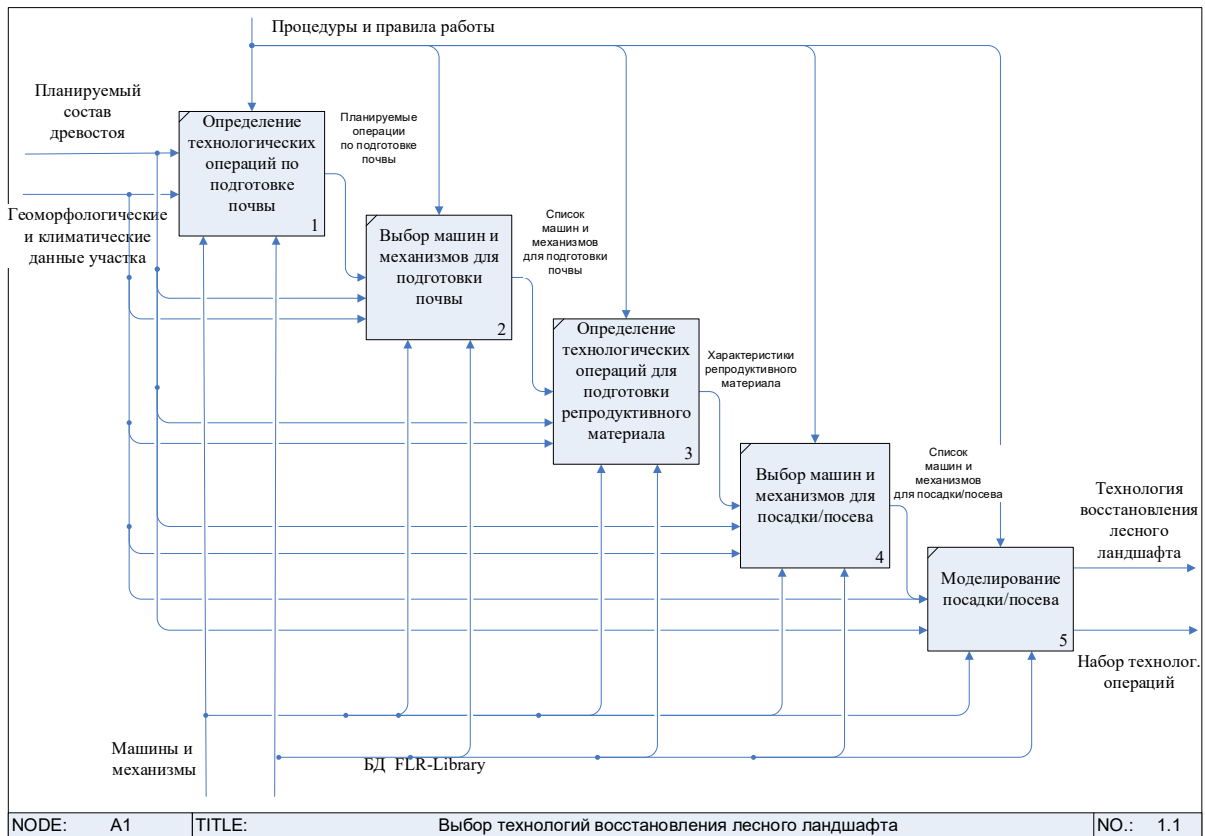


Рисунок 2. Результат декомпозиции контекстной диаграммы на A1 для справочной информационной системы для адаптивного восстановления лесных ландшафтов (FLR-Library)

Figure 2. The result of decomposition of a context diagram A1 for a reference information system for adaptive restoration of forest landscapes (FLR-Library)

Источник: собственные результаты авторов
Source: own results

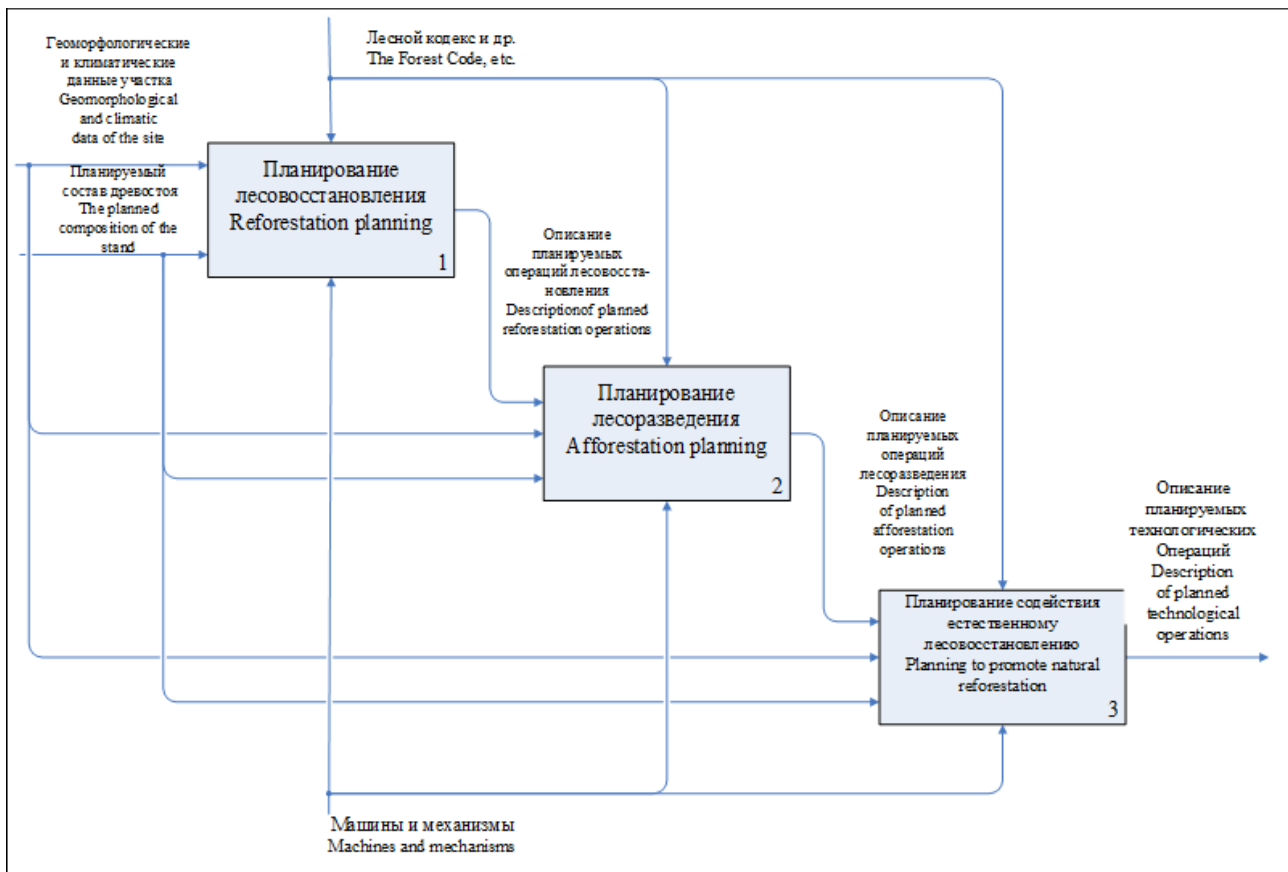


Рисунок 3. Результат декомпозиции контекстной диаграммы на A2 для справочной информационной системы для адаптивного восстановления лесных ландшафтов (FLR-Library)

Figure 3. The result of decomposition of a context diagram A2 for a reference information system for adaptive restoration of forest landscapes (FLR-Library)

Источник: собственные результаты авторов
Source: own results

В дальнейшем разработанная модель ляжет в основу программного обеспечения (ПО) СИС для адаптивного восстановления лесных ландшафтов, поэтому необходимо подробно рассмотреть компоненты диаграммы A2 с целью определения общих и различающихся входных переменных, которые способны описать каждый процесс, для дальнейшего применения в алгоритме ИС.

В результате моделирования были получены диаграммы A0, A1, A2, которые показывают структурированное изображение функций системы, информации и объектов, связывающих эти функции.

Заключение

В результате исследования было проведено моделирование СИС для адаптивного лесовосстановления. Информационная модель разработана с

учётом специфики отрасли, базируясь на данных по терминологии лесного хозяйства из различных стран мира и законодательства РФ (Лесной кодекс); охватывает весь процесс восстановления лесного ландшафта – от операций по подготовке почвы до моделирования древостоя; - от лесовосстановления до лесоразведения. На базе предложенной информационной модели будет разработано ПО СИС для адаптивного восстановления лесных ландшафтов (FLR-Library), которое сократит время принятия управленческого решения и повысит эффективность управления при восстановлении 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. Новикова, Т. П. Справочная информационная система FLR-Library для адаптивного лесовосстановления: кластерный анализ / Т. П. Новикова, А.И. Новиков, Е. П. Петрищев // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 12, № 3(45). – С. 164–179.– DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/12>.
3. Евдокимова, С. А. Применение алгоритмов кластеризации для анализа клиентской базы магазина / С. А. Евдокимова [и др.] // Моделирование систем и процессов. – 2021. – Т. 14, № 2. – С. 4-12. – DOI 10.12737/2219-0767-2021-14-2-4-12. <https://elibrary.ru/item.asp?id=46359564>.
4. Евдокимова, С. А. CASE-технологии : практикум / С. А. Евдокимова. – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2016. – 128 с. – <https://elibrary.ru/item.asp?id=29248570>
5. Евдокимова, С. А. Выбор методологии моделирования предметной области при проектировании информационной системы / С. А. Евдокимова // Моделирование систем и процессов. – 2015. – Т. 8, № 3. – С. 18-22. – DOI 10.12737/17161. <https://elibrary.ru/item.asp?id=25476426>
6. 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 10.3390/inventions7010001. <https://elibrary.ru/item.asp?id=47544460>
7. Экспресс-анализ семян в лесохозяйственном производстве: теоретические и технологические аспекты / А. И. Новиков, М. В. Драпалюк, С. В. Соколов, Т. П. Новикова. – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2022. – 176 с. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48309574>
8. Программное обеспечение для управления системой технического обслуживания и ремонта лесных машин: оценка применимости / А. Н. Заикин [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13, № 2(50). – С. 105-127. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2023.2/6. <https://elibrary.ru/item.asp?id=54525086>
9. Цифровизация системы организации рабочих процессов лесозаготовительных машин: оценка эффективности на примере «Ponss», «Komatsu» и «John Deere» / В. В. Сиваков [и др.] // Лесотехнический журнал. - 2023. - Т. 13. -№3(51). - С. 200-218. - DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/14>.
10. Labelle, Eric R. & Kemmerer, Julia. (2022). Business Process Reengineering of a Large-Scale Public Forest Enterprise Through Harvester Data Integration. Croatian journal of forest engineering. 43. DOI: <https://doi.org/10.5552/crojfe.2022.1129>.
11. Soderberg, Jon & Wallerman, Jorgen & Almang, Anders & Moller, Johan & Willen, Erik. (2021). Operational prediction of forest attributes using standardised harvester data and airborne laser scanning data in Sweden. Scandinavian Journal of Forest Research. 36. 1-9. DOI: 10.1080/02827581.2021.1919751.
12. Kim, Gyun-Hyung & Kim, Ki-Duck & Lee, Hycon-Scung & Choi, Yunsung & Mun, Ho-Scong & Oh, Jaehyun & Shin, Bcom-Soo. (2021). Development of Wi-Fi-Based Teleroperation System for Forest Harvester. Journal of Biosystems Engineering. 46. DOI: 10.1007/s42853-021-00100-2.
13. Kemmerer, Julia & Labelle, Eric R.. (2021). Using harvester data from on-board computers: a review of key findings, opportunities and challenges. European Journal of Forest Research. 140. DOI: 10.1007/s10342-020-01313-4.
14. Техническое обслуживание технологических машин на базе цифровизации / А. К. Тугенгольд, Р. Н. Волошин, А. Р. Юсупов, Т. Н. Круглова // Вестник Донского государственного технического университета. 2019. Т. 19. № 1. С. 74-80. DOI 10.23947/1992-5980-2019-19-1-74-80.
15. 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://elibrary.ru/item.asp?id=54691529>
16. The features designed of mechatronic system of adaptive hopper's feeder: case study for Scots pine seeds morphology / P. Tylek, D. N. Demidov, M. N. Lysych [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,

Voronezh, 23 октября 2020 года. – Voronezh, 2020. – P. 012054. – DOI 10.1088/1755-1315/595/1/012054. <https://elibrary.ru/item.asp?id=44464703>

17. Novikov, A. I. Non-Destructive Quality Control of Forest Seeds in Globalization: Problems and Prospects of Output Innovative Products / A. I. Novikov, T. P. Novikova // Globalization and its socio-economic consequences : Proceedings, Rajecke Teplice, Slovak Republic, 10–11 октября 2018 года. – Rajecke Teplice, Slovak Republic: University of Zilina, 2018. – P. 1260-1267. <https://elibrary.ru/item.asp?id=36825831>

18. Влияние климатического индекса градусо-дней на виталитет 3-летних семян сосны обыкновенной из сортированных по спектрометрическим свойствам семян / Е. П. Петрищев [et al.] // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12, № 1(45). – С. 110-118. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2022.1/9. <https://elibrary.ru/item.asp?id=48271757>

19. Express analysis of seeds in forestry production: theoretical and technological aspects / A. I. Novikov, M. V. Drapalyuk, S. V. Sokolov, T. P. Novikova. – Voronezh : Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, 2022. – 176 p. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48309574>

20. Новикова, Т. П. Оценка качества лесосеменного материала на экспериментальном участке сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) при адаптивном восстановлении лесных ландшафтов // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13, № 1(49). – С. 112-128. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2023.1/8. <https://elibrary.ru/item.asp?id=53814693>

References

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

2. Novikova, T. P. The FLR-Library reference information system for adaptive reforestation: cluster analysis / T. P. Novikova, A.I. Novikov, E. P. Petrishchev // Forestry Engineering Journal. – 2023. – Т. 12, № 3(45). – С. 164–179.– DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/12>.

3. Evdokimova, S. A. Application of clustering algorithms for analyzing the customer base of the store / S. A. Evdokimova [et al.] // Modeling of systems and processes. - 2021. – Vol. 14, No. 2. – pp. 4-12. – DOI 10.12737/2219-0767-2021-14-2-4-12. <https://elibrary.ru/item.asp?id=46359564>

4. Evdokimova, S. A. CASE technologies : practicum / S. A. Evdokimova. – Voronezh : Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, 2016. – 128 p. <https://elibrary.ru/item.asp?id=29248570>

5. Evdokimova, S. A. The choice of methodology for modeling the subject area in the design of an information system / S. A. Evdokimova // Modeling of systems and processes. – 2015. – Vol. 8, No. 3. – pp. 18-22. – DOI 10.12737/17161. <https://elibrary.ru/item.asp?id=25476426>

6. 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 10.3390/inventions7010001. <https://elibrary.ru/item.asp?id=47544460>

7. Express analysis of seeds in forestry production: theoretical and technological aspects / A. I. Novikov, M. V. Drapalyuk, S. V. Sokolov, T. P. Novikova. Voronezh : Voronezh State University-I. M. Sechenov State Forestry Engineering University, 2022. – 176 p. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48309574>

8. Software for managing the system of maintenance and repair of forest machines: an assessment of applicability / A. N. Zaikin [et al.] // Forestry Journal. – 2023. – Vol. 13, No. 2(50). – pp. 105-127. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2023.2/6 . <https://elibrary.ru/item.asp?id=54525086>

9. Digitalization of the workflow management system of logging machines: efficiency assessment using the example of «Ponsse», «Komatsu», and «John Deere» / V. V Sivakov. [et al.] // Lesotekhnicheskii zhurnal [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 3 (51), pp. 200-218 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/14>.

10. Labelle, Eric R. & Kemmerer, Julia. (2022). Business Process Reengineering of a Large-Scale Public Forest Enterprise Through Harvester Data Integration. *Croatian journal of forest engineering*. 43. DOI: 10.5552/crojfe.2022.1129.
11. Soderberg, Jon & Wallerman, Jorgen & Almang, Anders & Moller, Johan & Willen, Erik. (2021). Operational prediction of forest attributes using standardised harvester data and airborne laser scanning data in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 36. 1-9. DOI: 10.1080/02827581.2021.1919751.
12. Kim, Gyun-Hyung & Kim, Ki-Duck & Lee, Hycon-Scung & Choi, Yunsung & Mun, Ho-Scong & Oh, Jac-Hcun & Shin, Bcom-Soo. (2021). Development of Wi-Fi-Based Tclopuration System for Forest Harvester. *Journal of Biosystems Engineering*. 46. DOI: 10.1007/s42853-021-00100-2.
13. Kemmerer, Julia & Labcllc, Eric R.. (2021). Using harvester data from on-board computers: a review of key findings, opportunities and challenges. *European Journal of Forest Research*. 140. DOI: 10.1007/sl 0342-020-01313-4.
14. Maintenance of technological machines based on digitalization / A. K. Tugengold, R. N. Voloshin, A. R. Yusupov, T. N. Kruglova // *Bulletin of the Don State Technical University*. 2019. Vol. 19. no. 1.C.74-80. DOI 10.23947/1992-5980-2019-19-1-74-80.
15. 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://elibrary.ru/item.asp?id=54691529>
16. The features designed of mechatronic system of adaptive hopper's feeder: case study for Scots pine seeds morphology / P. Tylek, D. N. Demidov, M. N. Lysych [et al.] // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Voronezh, 23 октября 2020 года. – Voronezh, 2020. – P. 012054. – DOI 10.1088/1755-1315/595/1/012054. <https://elibrary.ru/item.asp?id=44464703>*
17. Novikov, A. I. Non-Destructive Quality Control of Forest Seeds in Globalization: Problems and Prospects of Output Innovative Products / A. I. Novikov, T. P. Novikova // *Globalization and its socio-economic consequences : Proceedings, Rajecke Teplice, Slovak Republic, 10–11 октября 2018 года. – Rajecke Teplice, Slovak Republic: University of Zilina, 2018. – P. 1260-1267. <https://elibrary.ru/item.asp?id=36825831>*
18. Novikova, T. P. The influence of the climatic index of degree days on the vitality of 3-year-old seedlings of scots pine from seeds sorted by spectrometric properties / T. P. Novikova, V. I. Malysheva, E. P. Petrishchev // *Forestry Journal*. – 2022. – vol. 12, No. 1(45). – pp. 110-118. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2022.1/9 . <https://elibrary.ru/item.asp?id=48271757>
19. Express analysis of seeds in forestry production: theoretical and technological aspects / A. I. Novikov, M. V. Drapalyuk, S. V. Sokolov, T. P. Novikova. – *Voronezh : Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, 2022. – 176 p. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48309574>*
20. Novikova, T. P. Assessment of the quality of forest seed material at the experimental site of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) during adaptive restoration of forest landscapes / T. P. Novikova // *Forestry Engineering Journal*. – 2023. – vol. 13, No. 1(49). – pp. 112-128. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2023.1/8. <https://elibrary.ru/item.asp?id=53814693>.

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, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087; <http://orcid.org/0000-0003-1279-3960>, e-mail: novikova_tp.vglta@mail.ru.

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

Лисицын Виктор Иванович – кандидат ф.-м. наук, профессор кафедры общей и прикладной физики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, <https://orcid.org/0000-0002-2148-1988>, viktor-lisicyn@yandex.ru

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

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, 394087, <http://orcid.org/0000-0003-1279-3960>, e-mail: novikova_tp.vglta@mail.ru.

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

Lisitsyn Victor Ivanovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor, of the Department of General and Applied Physics, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva St., Voronezh, Russian Federation, 394087, <https://orcid.org/0000-0002-2148-1988>, viktor-lisicyn@yandex.ru

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

✉ – Для контактов | Corresponding author


Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/8>


УДК 630 : 004.93'14



Фильтрация шумов сканируемого LiDAR участка леса на основе цветовых моделей YCbCr и L*a*b*

Дмитрий И. Рогачев ✉, rogachevdi@bmstu.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-7807-5294>

Иван В. Козлов, kozloviv@bmstu.ru  <https://orcid.org/0000-0001-7143-0006>

Владислав Е. Клубничкин, vkclubnichkin@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0002-1231-8185>

Мытищинский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им Н.Э. Баумана», ул. 1-ая Институтская, д. 1, г. Мытищи, 141005, Российская Федерация

Облака точек широко используются при наземном сканировании леса с помощью LiDAR и стереокамеры. Облака точек часто страдают от шума – выбросов и артефактов, искажающих данные. Аппаратно точность и качество исходного облака точек при наземном сканировании участка леса может быть повышена с помощью использования сканеров с более высоким расширением, а также с помощью фотограмметрии или дополнительных датчиков. Для устранения шума могут использоваться программные способы: фильтрация точек, сглаживание, статистические методы и алгоритмы реконструкции. Новый подход к фильтрации шумов сканируемого участка леса основан на анализе значений цветовых компонент в пространствах YCbCr и L*a*b*. Исследовали свойства цветовых моделей YCbCr и L*a*b* и определили пороговые значения для классификации точек как шумовых или объектных в зависимости от их расстояния до центроидов. Применение комбинированного (YCbCr | L*a*b*) фильтра на облаке точек сократило количество точек до 38963 (17,41% от исходного количества). При проведении калибровки камеры и LiDAR на основании (YCbCr | L*a*b*) фильтра общее среднее значение ошибок перевода составило 0,0247 м, вращения 6,244 град, перепроецирования 8,385 пикселей. Способ (YCbCr | L*a*b*) фильтрации показывает высокую точность и надежность в удалении шумов и сохранении целостности объектов в облаке точек, что позволит в последующем использовать полученные данные на беспилотных машинах при выполнении лесозаготовительных операций.

Ключевые слова: *облако точек, LiDAR, наземное сканирование леса, фильтрация шумов, обработка облака точек, цифровая модель леса, Livox MID70, YCbCr, L*a*b**

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Рогачев Д. И. Фильтрация шумов сканируемого LiDAR участка леса на основе цветовых моделей YCbCr и L*a*b* / Д. И. Рогачев, И. В. Козлов, В. Е. Клубничкин // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 4 (52). – Ч. 1. – С. 125–139. – Библиогр.: с. 135–139 (28 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/8>.


Поступила 07.09.2023. Пересмотрена 28.11.2023. Принята 29.11.2023. Опубликовано онлайн 29.12.2023.

Article

Noise filtering of the forest site scanned by LiDAR based on YCbCr and L*a*b* color models

Dmitry I. Rogachev ✉, rogachevdi@bmstu.ru  <https://orcid.org/0000-0002-7807-5294>

Ivan V. Kozlov, kozloviv@bmstu.ru  <https://orcid.org/0000-0001-7143-0006>

Vladislav E. Klubnichkin, vklubnichkin@gmail.com  <https://orcid.org/0000-0002-1231-8185>

Mytishi branch Bauman Moscow State Technical University, 1st Institutskaya str., 1, Mytishchi, 141005, Russian Federation

Abstract

Point clouds are widely used in ground-based forest scanning using LiDAR and stereo cameras. Point clouds often suffer from noise outliers and artifacts that distort data. Hardware accuracy and quality of the initial point cloud during ground scanning of a forest area can be improved by using scanners with higher expansion, as well as using photogrammetry or additional sensors. To eliminate noise, software methods can be used: point filtering, smoothing, statistical methods and reconstruction algorithms. A new approach to filtering the noise of the scanned forest area is based on the analysis of the values of the color components in the YCbCr- and L*a*b- spaces. The properties of the YCbCr- and L*a*b-color models were investigated and threshold values for classifying points as noise or object depending on their distance to the centroids were determined. The use of a combined (YCbCr | L*a*b) filter on the point cloud reduced the number of points to 38 963 (17.41% of the original number). When calibrating the camera and LiDAR based on the (YCbCr | L*a*b) filter, the total average value of translation errors was 0.0247 m, rotation 6,244 degrees, reprojection 8,385 pixels. The noise-filtering method (YCbCr | L*a*b) shows high accuracy and reliability in removing noise and maintaining the integrity of objects in the point cloud, which will allow the data obtained on unmanned machines to be used later when performing logging operations.

Keywords: *point cloud, LiDAR, ground scanning of the forest, noise filtering, point cloud processing, digital model of the forest, Livox MID70, YCbCr, L*a*b**

Funding: this research received no external funding.

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

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

For citation: Rogachev D.I., Kozlov I.V., Klubnichkin V.E. (2023). Noise filtering of the forest site scanned by LiDAR based on YCbCr and L*a*b* color models. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 4 (52), part 1, pp. 125-139 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/8>.

Received 07.09.2023. *Revised* 28.11.2023. *Accepted* 29.11.2023. *Published online* 29.12.2023.

Введение

Одним из наиболее распространенных применений LiDAR в лесном хозяйстве является мониторинг состояния лесов. С помощью этой технологии можно отслеживать площадь лесного участка, его высоту над уровнем моря, форму и размеры деревьев, а также их возраст и состояние [1].

Облако точек представляет собой набор трехмерных координатных данных, полученных с помощью различных датчиков, таких как лазерное сканирование (LiDAR) и стереокамеры. Они являются важным источником информации в области компьютерного зрения, автономного вождения, аэрокосмической техники и других отраслях, где трехмерная информация играет

ключевую роль [2]. На рис. 1 представлен фрагмент облака точек, полученных при наземном сканировании во время проведения лесозаготовительных операций валочно-сучкорезно-раскряжевочной и погрузочно-транспортной машиной.

О возможности определения параметров растущего дерева представленными выше способами описывается в научных публикациях Kuželka K. [3], Raul de Paula Pires [4], Yupan Zhang [5], Mingrui Dai [6], Krassnitzer [7], Gollob [8], Liang [9], Покоева М.В [10], Демидов Д. Н. [11], Кабонен А. В. [12], Низаметдинов Н.Ф. [13]. В некоторых работах отображено определение диаметра поперечного сечения ствола дерева за счет аппроксимации точек. Стоит отметить, что облако точек, получаемое при наземном сканировании леса, может содержать большое количество шума, несущественных или дублирующих точек, которые могут затруднять выполнение анализа объектов, искажая их.

Для исключения шума применяются методы, основанные на RANSAC [14, 15], суть методов заключается в выделении точек, относящихся к контуру описанному целевой функции, вследствие этого при большем количестве точек относящихся к шуму возможно повышение вероятности

результатов и в некоторых случаях неоправданно большому числу итераций [16].

В качестве шума при наземном сканировании леса выступают точки, относящиеся к листве (рис. 2), вследствие этого возникает потребность дополнительной фильтрации для выделения массива точек, относящихся к стволам дерева.



Рисунок 2. Подлесок

Источник: собственная композиция авторов

Figure 2. Undergrowth

Source: author's composition

Цель исследования – повышение качества снижения шума в облаке точек при LiDAR наземном сканировании леса путем удаления точек, относящихся к листве, с помощью $(YCbCr | L^*a^*b)$ фильтрации.

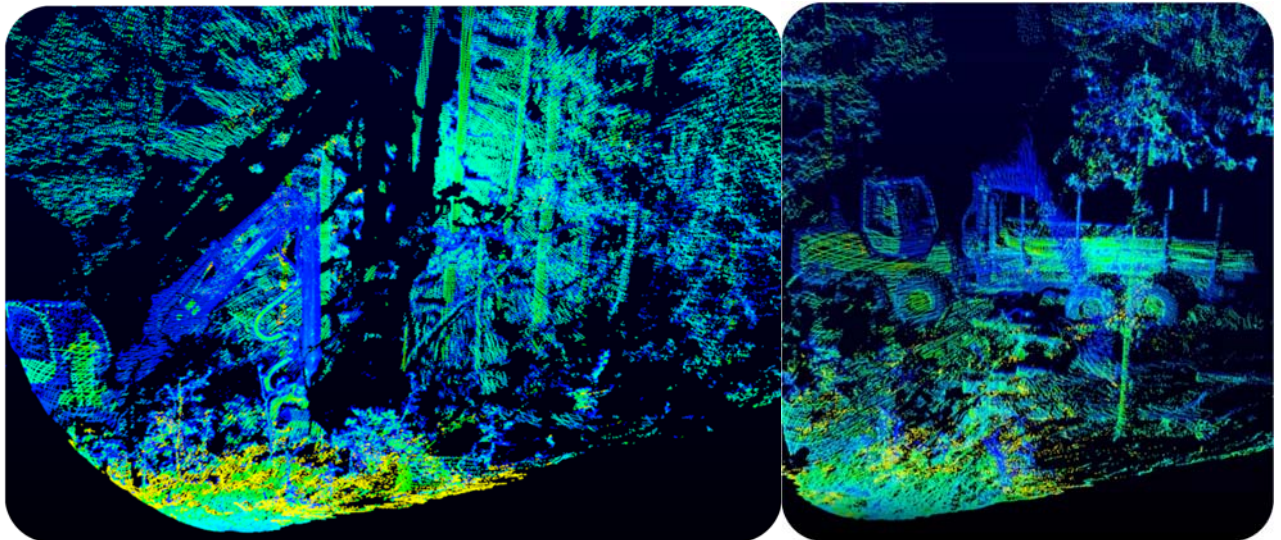


Рисунок 1. Облако точек при наземном сканировании во время проведения лесозаготовительных операций

Источник: собственная композиция авторов

Figure 1. Point cloud during ground scanning during logging operations

Source: author's composition

Материалы и методы

Предмет и объект исследований

Объектом исследования в рамках данной работы является RGB-изображение или LiDAR-облако точек участка леса.

Предмет исследований – процедура программной фильтрации изображения или облака точек на основе комбинированного использования цветowych моделей YCbCr и L^*a^*b .

Сбор данных

При сборе данных применяли лазерный сканер LIVOX MID-70 и экшн-камеру GoPro HD HERO3 Edition (рис. 3).



Рисунок 3. Процесс калибровки

Источник: собственная композиция авторов

Figure 3. Calibration process

Source: authors' own calculations

Последовательность работ при сборе данных:

- 1) Калибровка камеры для учета дисторсии;
- 2) Калибровка лазерного сканера и камеры;
- 3) Сбор данных.

Среди многочисленных типов методов объединения данных датчиков, комбинация LiDAR и камеры является одной из наиболее часто используемых пар датчиков для восприятия окружающей среды. LiDAR могут предоставлять данные облака трехмерных точек, которые включают точную информацию о глубине и интенсивности отражения, в то время как камеры фиксируют богатую семантическую информацию о

сцене. Комбинация камеры и LiDAR позволяет устранить недостатки каждого датчика [17, 18]. Основная проблема при объединении этих двух разнородных датчиков состоит в том, чтобы найти точные внутренние параметры камеры и преобразование твердого тела между системами координат датчика путем выполнения внешней калибровки [19].

С ростом использования компьютерного зрения в различных областях, таких как автоматическое вождение, робототехника, медицинская обработка изображений и визуальные эффекты, становится все более важным понимать и учитывать дисторсию. Дисторсия – это искажение или изменение формы объектов, возникающее при передаче или обработке сигналов или изображений. Она может возникать из-за различных факторов, таких как оптические аберрации, физические искажения, нелинейности и другие воздействия на сигнал или изображение [20].

Причины дисторсии:

– Оптическая дисторсия: объективы камер имеют определенные оптические аберрации, которые могут приводить к искажению изображений. Примеры оптической дисторсии включают радиальную дисторсию (искажение круговых форм) и тангенциальную дисторсию (искажение прямых линий).

– Геометрическая дисторсия: это искажение, которое возникает, когда источник или объект находятся вне плоскости изображения, что приводит к искажению и неправильному представлению геометрии объектов на изображении.

Виды дисторсии (рис. 4):

– Радиальная дисторсия. Это тип дисторсии, который приводит к искажению изображения в форме радиуса относительно оптического центра. Радиальная дисторсия может быть плюсовой (вогнутость) или минусовой (выпуклость) в зависимости от характера искажения.

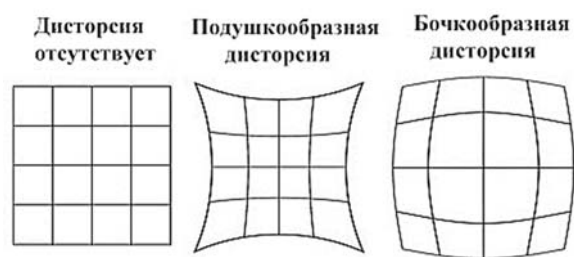


Рисунок 4. Дисторсия

Источник: режим доступа:

<http://sainfo.ru/optika/img/t30.gif>

Figure 4. Distortion

Source: URL: <http://sainfo.ru/optika/img/t30.gif>

– Тангенциальная дисторсия. Это тип дисторсии возникает из-за не параллельности оптической оси камеры и плоскости изображения. Она приводит к наклону линий на изображении.

– Плоскостная дисторсия. Это тип дисторсии, который возникает из-за не гомогенности объектива или неправильной конструкции оптической системы. Она может приводить к искажению формы или размера объектов на изображении.

– Фокусирующая дисторсия. Этот тип дисторсии проявляется в изменении фокусного расстояния объектива по мере движения зума. Она может приводить к изменению масштаба объектов на изображении.

В зависимости от сложности оптической системы и характеристик объектива, могут возникать и другие виды дисторсии. Коррекция дисторсии включает в себя оценку параметров дисторсии и применение математических моделей для обработки изображений и восстановления правильной формы, пропорций и линий.

Калибровка камеры осуществлялась на базе 8 фотографий мишени в виде шахматной доски с размером клетки 80 мм [21].

Средняя ошибка повторного проецирования (reprojection error) (рис. 5.а) для каждого изображения является метрикой, которая используется для оценки точности калибровки

камеры или точности реконструкции трехмерной сцены.

Суть средней ошибки повторного проецирования заключается в сравнении исходных координат точек на изображении с их проекциями на плоскость изображения после калибровки или реконструкции. Метрика измеряется в пикселях и представляет собой среднее расстояние между исходными и проекционными точками для всех точек на изображении.

Чем меньше средняя ошибка повторного проецирования, тем более точная калибровка или реконструкция. Она является показателем того, насколько точно камера может сопоставить трехмерные точки с их проекцией на изображение.

Для калибровки лазерного сканера и web-камеры использовалось 15 сцен (облака точек и фотоизображение).

Ошибка перевода (рис. 5.б) – разница между координатами центра плоскостей шахматной доски в облаках точек и координатами на соответствующих изображениях в метрах.

Ошибка поворота (рис. 5.в) – разница между нормальными углами, определенными плоскостями шахматной доски в облаках точек, и углами на соответствующих изображениях в радианах.

Ошибка пере-проецирования (рис. 5.г) – разница между спроецированными (преобразованными) координатами центра плоскостей шахматной доски из облаков точек и координатами на соответствующих изображениях в пикселях.

Результат калибровки представлен на рисунке 6.

При проведении калибровки камеры на базе 8 фотографий мишени общая средняя ошибка составила 0,24 пикселя. При проведении калибровки камеры и лазерного сканера LIDAR общее среднее значение ошибки: перевода составило 0,0247 м; вращения 6,244 град; пере-проецирования 8,385 пиксель.

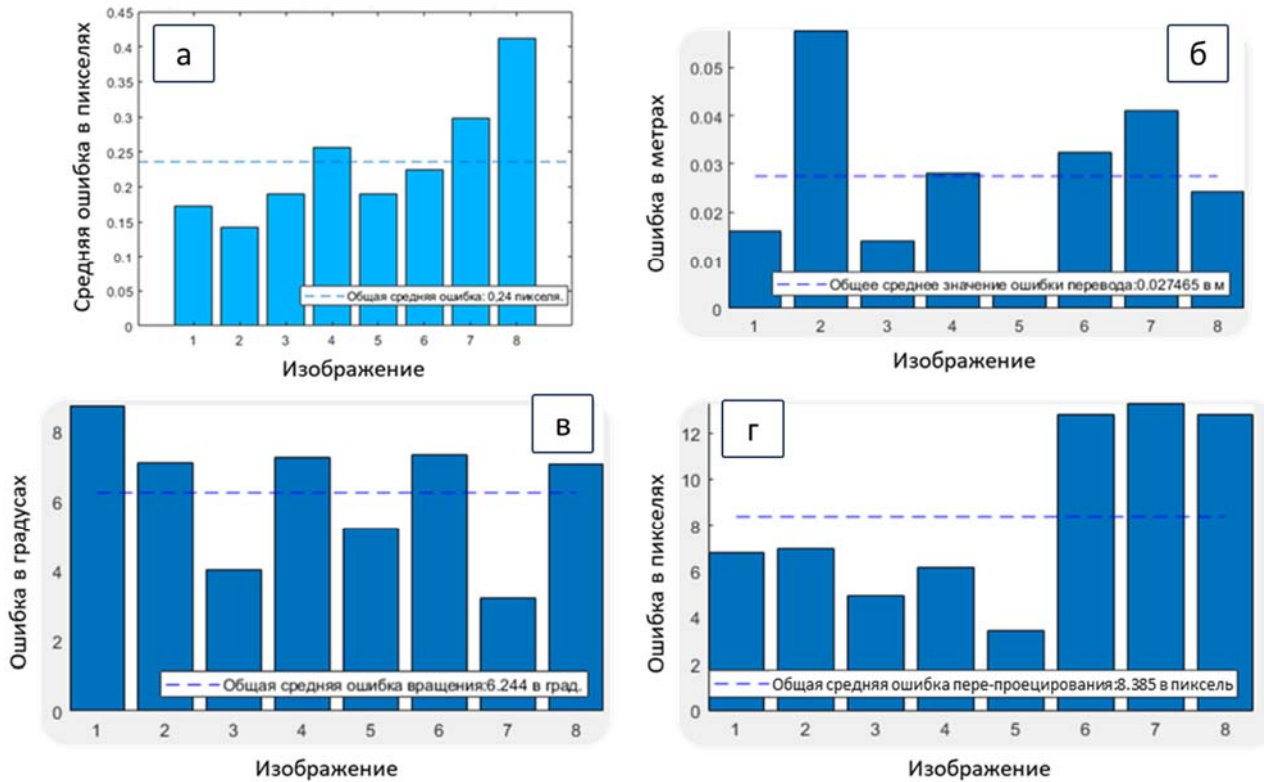


Рисунок 5. Метрики характеризующие точность калибровки оборудования а) Средняя ошибка пере-проецирования на изображение; б) Ошибка перевода; в) Ошибка поворота; г) Ошибка пере-проецирования
 Источник: собственные результаты авторов

Figure 5. Metrics characterizing the accuracy of calibration of equipment а) Average reprojection error on the image; б) Translation error; в) Rotation error; г) Reprojection error
 Source: authors' own results

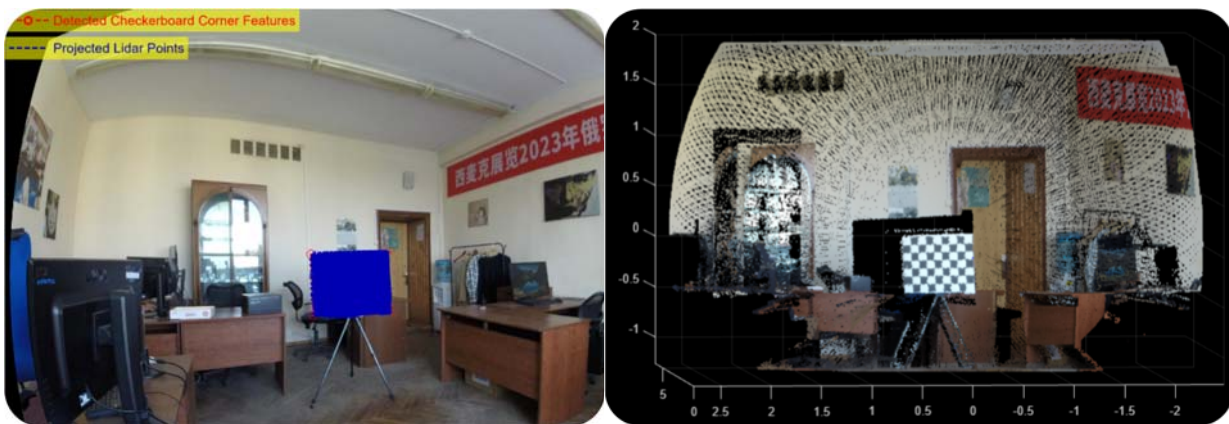


Рисунок 6. Результат калибровки
 Источник: собственная композиция авторов

Figure 6. Calibration result
 Source: authors' own calculations

Анализ данных

Исходными данными для анализа является массив точек с значением цвета по цветовой модели RGB

$$points = \begin{pmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & R_1 & G_1 & B_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n & Y_n & Z_n & R_n & G_n & B_n \end{pmatrix},$$

где $[X, Y, Z]$ – координаты в декартовой системе координат, $[R, G, B]$ – значения цветового канала RGB

RGB (Red, Green, Blue), CIE 1976 $L^*a^*b^*$ (Lightness, a , b – далее $L^*a^*b^*$), YCbCr (Luma, Chrominance Blue, Chrominance Red) – это три различных цветовых моделей, используемые для представления цвета в компьютерной графике, обработке изображений и других областях. Вот некоторые основные различия между ними:

А) Цветовые представления:

– В модели RGB цвет представлен с помощью комбинации трех основных цветов: красного (Red), зеленого (Green) и синего (Blue) (рис. 7). Каждый цветовой канал представляет интенсивность

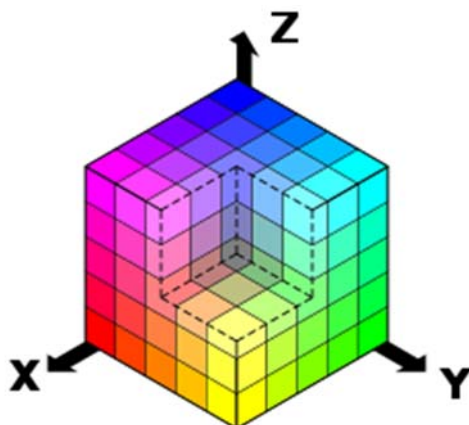


Рисунок 7. RGB-цветовая модель, представленная в виде куба

Источник: Режим доступа:

<https://novainfo.ru/res/re38y1mgzr.webp>Figure

7. RGB color model represented as a cube

Source: URL: <https://novainfo.ru/res/re38y1mgzr.webp>

соответствующего основного цвета и принимает значения от 0 до 255. Комбинация этих трех основных цветов в различных пропорциях создает весь цветовой спектр.

– В модели $L^*a^*b^*$ цвет представлен тремя компонентами: светлотой (Lightness), компонентой a и компонентой b (рис. 8). Светлота указывает на яркость цвета и изменяется от 0 до 100. Компоненты a и b представляют цветовые отклонения от нейтрального серого цвета: компонента a представляет диапазон от зеленого (-128) до красного (+127), а компонента b представляет диапазон от синего (-128) до желтого (+127) [22, 23].

– Модель YCbCr состоит из трех компонентов: яркости (Luma) и двух цветовых разностей – синей (Chrominance Blue) и красной (Chrominance Red) (рис. 9). Компонент яркости представляет освещенность пикселя и обычно отображается от 0 до 255. Компоненты цветовых разностей отражают цветовые отклонения от серого и имеют диапазон значений от -128 до +127.

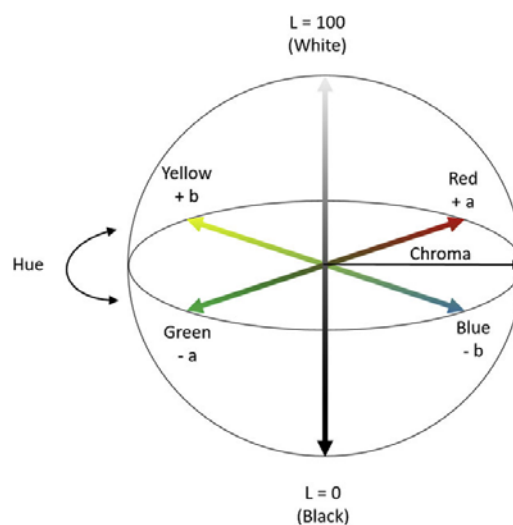


Рисунок 8. $L^*a^*b^*$ -цветовая модель

Источник: из статьи [22]

Figure 8. $L^*a^*b^*$ -color model

Source: from the article [22]

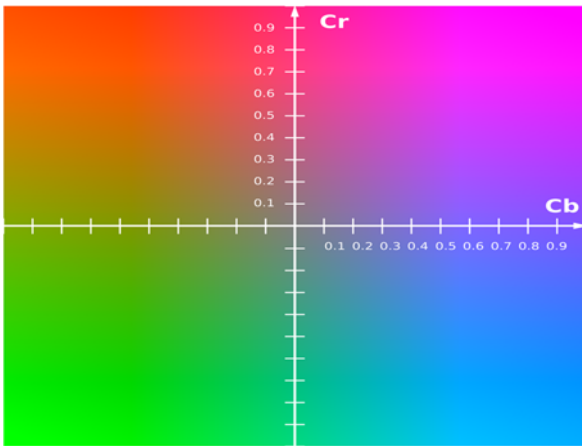


Рисунок 9. Плоскость CbCr при постоянной яркости $Y'=0.5$

Источник: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/34/YCbCr-CbCr_Scaled_Y50.png/1024px-YCbCr-CbCr_Scaled_Y50.png

Figure 9. CbCr plane at constant brightness $Y'=0.5$

Source: URL: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/34/YCbCr-CbCr_Scaled_Y50.png/1024px-YCbCr-CbCr_Scaled_Y50.png

Б) Восприятие цвета:

– Модель RGB основана на аддитивной смеси трех основных цветов и нацелена на отображение цвета на устройствах с подсветкой, таких как мониторы, телевизоры, светодиоды. Восприятие цвета в модели RGB связано с эмиссией света и реагирует на изменение интенсивности основных цветов.

– Модель $L^*a^*b^*$ ориентирована на более естественное и полное представление восприятия цвета человеком. Она базируется на цветовом пространстве CIE XYZ, которое моделирует отображение цвета так, как его воспринимает человек. Модель $L^*a^*b^*$ позволяет объективно описывать цвета, включая яркость, насыщенность и оттенок, и является универсальной моделью для международной коммуникации цвета.

– Модель YCbCr представляет цвет, учитывая освещенность и цветовые разности. Она хорошо подходит для компрессии цвета, поскольку позволяет более эффективно кодировать яркость и цветовую информацию по отдельности. Модель YCbCr также широко используется в видео кодировании, а также в системах передачи изображений и видео.

В) Применение и преимущества:

– Модель RGB широко используется в обработке изображений, компьютерной графике и видео технологиях, особенно при работе с отображением цвета на устройствах с подсветкой. Она позволяет легко выполнить цветовые преобразования, наложение цветных фильтров и манипуляции с основными цветами.

– Модель $L^*a^*b^*$ находит применение в областях, связанных с цветовой коррекцией, сопоставлением цветов, распознаванием образов и других задачах, где требуется более точное и согласованное описание цвета. Модель $L^*a^*b^*$ обеспечивает большую гибкость и точность в работе с цветом, позволяет легко выполнить изменения яркости, насыщенности и оттенка, а также обеспечивает более согласованное и непрерывное восприятие цвета визуально.

– Модель YCbCr хорошо подходит для компрессии и передачи видеозображений, так как может отдельно кодировать яркость и цветовую информацию. Она позволяет более эффективное использование пропускной способности и снижение размера файлов для хранения видеоданных.

Для конвертации RGB в $L^*a^*b^*$, переведем RGB в CIE XYZ, а потом в $L^*a^*b^*$.

Матрица перевода:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,49 & 0,31 & 0,2 \\ 0,176 & 0,81 & 0,01 \\ 0 & 0,01 & 0,99 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}.$$

Для конвертации примем следующие значения, где X_n, Y_n, Z_n – координаты точки белого в значении CIE XYZ (буква n означает «нереализованность») [24]:

$$\begin{cases} L^* = 116 \cdot \left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16, \\ a^* = 500 \cdot \left(\left(\frac{X}{X_n}\right) - \left(\frac{Y}{Y_n}\right)\right), \\ b^* = 200 \cdot \left(\left(\frac{X}{X_n}\right) - \left(\frac{Z}{Z_n}\right)\right). \end{cases}$$

Конвертация RGB в YCbCr:

$$\begin{cases} Y' = 0,299 \cdot R + 0,587 \cdot G + 0,114 \cdot B, \\ C_B = 128 - 0,168 \cdot R - 0,331 \cdot G + 0,5 \cdot B, \\ C_R = 128 + 0,5 \cdot R - 0,418 \cdot G - 0,081 \cdot B. \end{cases}$$

Результаты

Для фильтрации точек воспользуемся двумя цветовыми моделями. Использование ограничений

по цветовой модели $L^*a^*b^*$ обуславливается возможностью адекватной фильтрации зеленого цвета. Ограничения по каналу a – влияют на зеленый цвет, а по каналу b – на оранжевый цвет.

Ограничения по $L^*a^*b^*$

$$\begin{cases} L \in [0; 100], \\ a \in [-5; 35], \\ b \in [-50; 40]. \end{cases}$$

В свою очередь, необходимость дополнительных ограничений по цветовой модели $YCbCr$ обуславливается задачей фильтрации листвы в осенний период, когда листья могут быть одного цвета с корой верхней части ствола сосны обыкновенной. Для отсеивания ярко оранжевого цвета используется ограничение по каналу C_b

Ограничения по $YCbCr$:

$$\begin{cases} Y \in [16; 235], \\ C_b \in [105; 240], \\ C_r \in [16; 240]. \end{cases}$$

На рисунке 10 представлена работа фильтра на изображениях. Красным цветом отображена работа фильтра по $L^*a^*b^*$, фиолетовый цвет по $YCbCr$ и синий цвет точки совпадающие по двум фильтрам. На рис. 11 представлена работа фильтра на облаке точек.

На рис. 11 (а) представлен результат сканирования участка леса с применением технологии SLAM [25,26]. Изначальное количество точек в облаке точек представленного на рис. 11 (а) составляет 223758 в результате работы фильтра (рис. 11 (б)) количество точек уменьшилось до 38963, что составляет 17,41% от исходного количества точек.

Обсуждение

В результате работы фильтра могут оставаться одиночные или групповые наборы точек, отдаленные от основного облака пикселей, которые оказывают малое влияние на зашумление объекта сканирования. Фильтрацию данных точек логично реализовать на основе значения среднего расстояния до соседних точек.

Данный фильтр рассматривается как одна из составляющих частей элементов машинного зрения беспилотной лесозаготовительной машины. Вследствие этого стоит отметить важные факторы для стабильной работы фильтра в перспективе:

- 1) качественная калибровка Lidar и камеры;
- 2) количество мегапикселей камеры;
- 3) глубина цвета;
- 4) в ночное время освещённость области вокруг лесозаготовительной машины.

Стоит отметить принципиальное различие в предлагаемом фильтре в сравнении с другими методами фильтрации шумов. Метод RANSAC (Random Sample Consensus) – это статистический метод, который используется для оценки параметров математических моделей из набора наблюдений, в контексте фильтра точек используется для выделения геометрических примитивов описанных математической функции пример в работе Singh A [15]. В контексте определения параметров окружности (радиус и центр) работа метода RANSAC включает в себя: 1) случайная выборка некоторого количества точек из массива точек; 2) определение параметров окружности; 3) расчет отклонений остальных точек от окружности, параметры которой определены на шаге 2; 4) повторяются первые три шага многократно, чтобы найти окружность с наибольшим количеством отклонений. Проанализировав работу фильтра, можно сказать, что основное отличие при использовании фильтра, основанного на цветовой модели, заключается в отсутствии привязки к геометрическим формам сканируемых объектов.

Фильтр предлагаемый в работе автора Ren Yujuan [27] основан на методе главных компонент (PCA). Метод главных компонент (PCA) часто используется для анализа и извлечения основных характеристик многомерных данных, таких как облака точек, путем выделения главных компонент, которые наилучшим образом описывают изменчивость данных. Это помогает сжать информацию и выделить ключевые аспекты данных, такие как форма и ориентация объектов. Поэтому фильтр точек LiDAR на основе PCA может помочь в выделении основных структур облака точек. Таким образом, можно сказать, что PCA фокусируется на пространственной структуре данных облака точек, в то время как фильтр точек на основе цвета сфокусирован на использовании информации о цвете для обработки и анализа.

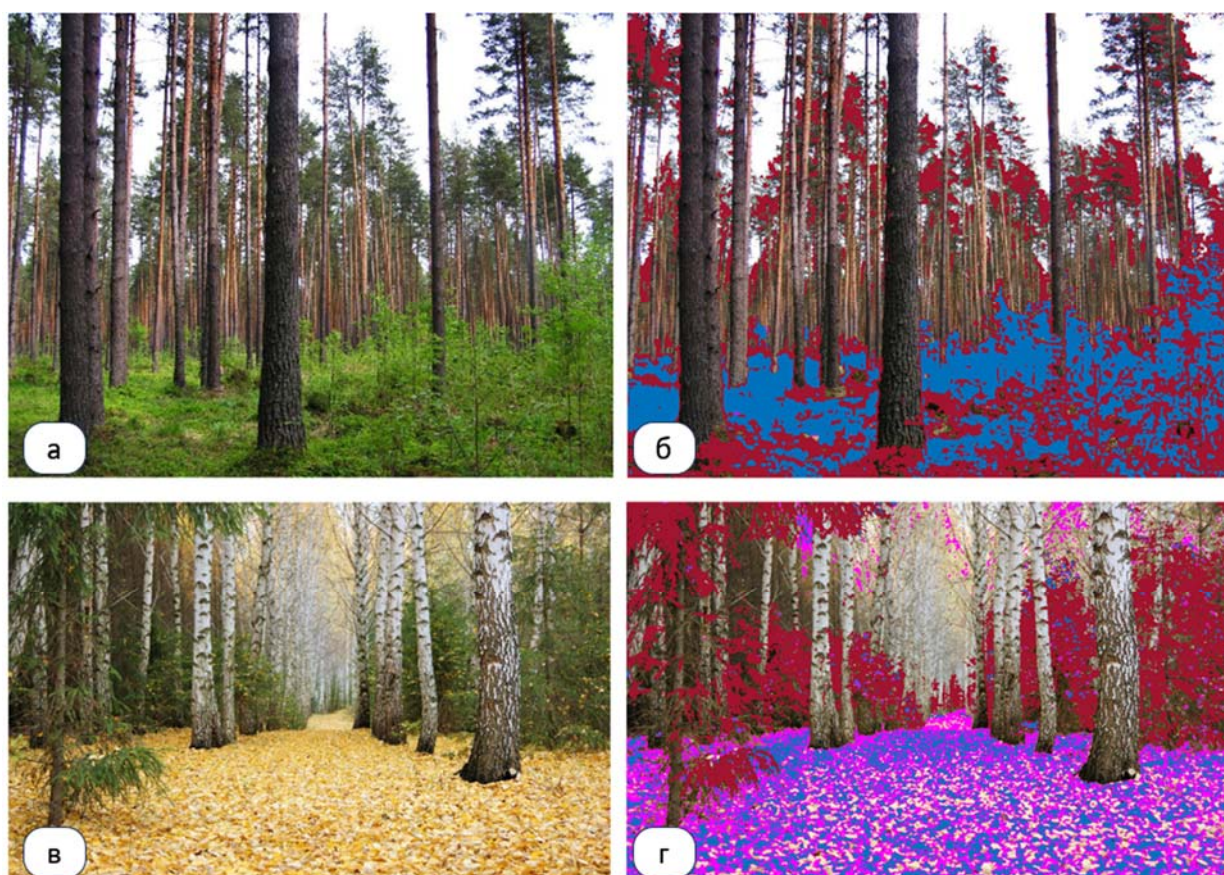


Рисунок 10. Работа фильтра на изображениях. а) изображение соснового древостоя; б) результат работы фильтра на изображении соснового древостоя; в) изображение аллеи; г) результат работы фильтра на изображении аллеи.

Источник: собственные результаты авторов

Figure 10. Filter operation on images. a) the image of a pine stand; b) the result of the filter on the image of a pine stand; c) the image of an alley; d) the result of the filter on the image of an alley.

Source: own results

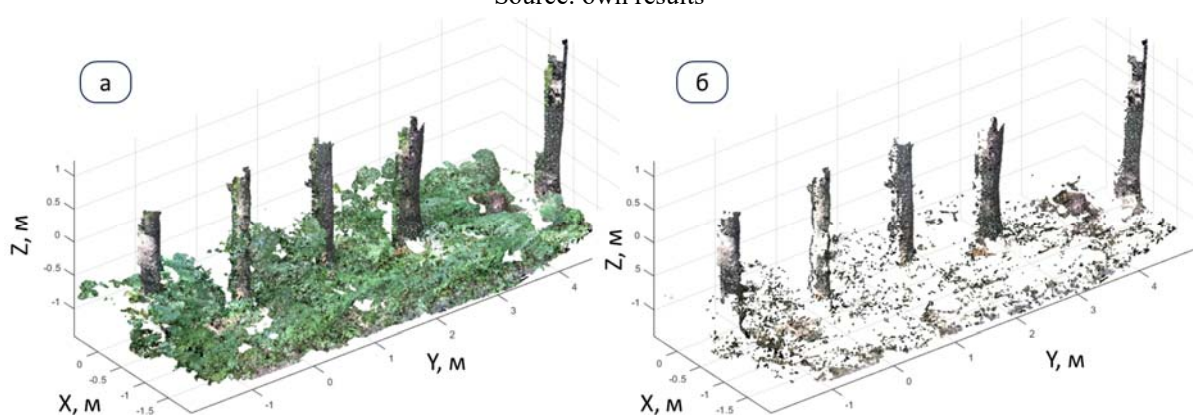


Рисунок 11. Работа фильтра на облаке точек: а) исходное облако точек; б) облако точек, полученное в результате обработки фильтром

Источник: собственные результаты авторов

Figure 11. Operation of the filter on the point cloud. a) the initial point cloud; b) the point cloud obtained as a result of filter processing

Source: own results

Фильтр, предлагаемый в работе автора Ren Yujuan [28], основан на методе k-средних (k-means). k-means – это алгоритм кластеризации, который разбивает набор данных на заранее определенное количество кластеров. Каждый кластер представляет собой группу точек, которые имеют схожие характеристики. Таким образом, работа фильтра точек, основанного на методе k-means, выглядит следующим образом: 1) инициализация центроидов, выбираются случайные точки в качестве начальных центроидов кластеров; 2) присваивание точек кластерам, каждая точка данных присваивается к ближайшему центроиду; 3) пересчет центроидов, после этого центроиды пересчитываются как среднее значение всех точек, отнесенных к соответствующему кластеру; 4) шаги 2 и 3 повторяются до тех пор, пока центроиды не стабилизируются или пока не будет достигнуто максимальное количество итераций. Для правильной работы алгоритма требуется знание числа кластеров заранее. В реальном мире это часто является проблемой, так как количество кластеров может меняться или быть неизвестным. Так же возникает потребность в реализации математической функции дистанции с помощью которой будут определяться центроиды. В случае неправильно выбранной функции возможно ошибочное разбиение точек относящихся к одному объекту на разные кластеры. Также важным фактором является реализация оценки кластеров на принадлежность их к шуму.

Заключение

Для устранения шума при наземном сканировании леса могут использоваться различные методы обработки данных, такие как фильтрация

точек, сглаживание, статистические методы и алгоритмы реконструкции. Однако, важно учитывать, что полная очистка шума в неконтролируемых условиях, таких как лес, может быть сложной задачей. Точность и качество исходного облака точек при проведении работ под пологом леса может быть повышена с помощью использования сканеров с более высоким расширением, а также с использованием дополнительных информационных источников, таких как фотограмметрия или дополнительные датчики.

При проведении калибровки камеры на базе 8 фотографий мишени общая средняя ошибка составила 0,24 пикселя. При проведении калибровки камеры и лазерного сканера LIDAR общее среднее значение ошибки: перевода составило 0,0247 м; вращения 6,244 град; пере-проецирования 8,385 пиксель.

Разработанный фильтр позволяет в некоторых сценах сканированного участка леса снизить количество точек в пять раз. В рассмотренном случае с 223758 до 38963, что составило 17,41% от исходного количества точек.

В целом, фильтр облака точек, основанный на цветовых моделях YCbCr и L^*a^*b , позволит получить более чистую и точную информацию из облака точек и использовать ее для различных приложений, таких как 3D-сканирование, реконструкция сцены и дополненная реальность. Все это дает возможность в ближайшей перспективе применять полученные данные на беспилотных машинах, которые на сегодняшний день активно внедряются в отраслях промышленности, в том числе и лесозаготовительной.

Список литературы

1. Kabonen, Alexey & Ivanova, Natalya. Tree attribute assessment in urban greenwood using ground-based LiDAR and multiseasonal aerial photography data. *Nature Conservation Research*. 2023; 8: 64-83. DOI: <http://doi.org/10.24189/ncr.2023.005>.
2. Yang B., Haala N., Dong Z. Progress and perspectives of point cloud intelligence // *Geo-spatial Information Science*. – 2023. – С. 1-17. DOI: <http://doi.org/10.1080/10095020.2023.2175478>.
3. Kuželka K., Marušák R., Surový P. Inventory of close-to-nature forest stands using terrestrial mobile laser scanning // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2022; 115:103104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103104>

4. Pires, Raul & Olofsson, Kenneth & Persson, Henrik & Lindberg, Eva & Holmgren, Johan. (2022). Individual tree detection and estimation of stem attributes with mobile laser scanning along boreal forest roads. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2022; 187: 211-224. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.03.004>.
5. Zhang, Yupan & Tan, Yiliu & Onda, Yuichi & Hashimoto, Asahi & Gomi, Takashi & Chiu, Chenwei & Inokoshi, Shodai. (2023). A tree detection method based on trunk point cloud section in dense plantation forest using drone LiDAR data. *Forest Ecosystems*. 2023; 10: 100088. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.fecs.2023.100088>.
6. Dai, Mingrui & Li, Guohua. (2023). Soft Segmentation of Terrestrial Laser Scanning Point Cloud of Forests. *Applied Sciences*. 2023; 13: 6228. DOI: <http://doi.org/10.3390/app13106228>.
7. Krassnitzer, Ralf & Nothdurft, Arne & Ritter, Tim & Tockner, Andreas & Erber, Gernot & Kühmaier, Martin & Hönigsberger, Ferdinand & Varch, Thomas & Holzinger, Andreas & Stampfer, Karl & Gollob, Christoph. Measurement of Individual Tree Parameters with Carriage-Based Laser Scanning in Cable Yarding Operations. *Croatian journal of forest engineering*. 2023; 2: 44 DOI: <http://doi.org/44.10.5552/crojfe.2023.2252>.
8. Gollob, Christoph & Ritter, Tim & Wassermann, Clemens & Nothdurft, Arne. (2019). Influence of Scanner Position and Plot Size on the Accuracy of Tree Detection and Diameter Estimation Using Terrestrial Laser Scanning on Forest Inventory Plots. *Remote Sensing*. 2019; 11: 1602. DOI: <http://doi.org/10.3390/rs11131602>.
9. Liang X. et al. International benchmarking of terrestrial laser scanning approaches for forest inventories // *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*. 2018; 144: 137-179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.06.021>
10. Покоева М.В., Ярославцев А.М. Экологические исследования смешанных насаждений методами дистанционного зондирования // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2020; 24 (3): 33–38. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-3-33-38>.
11. Демидов Д. Н. Исследование алгоритма оценки параметров предполетной ориентации средств управления беспилотного летательного аппарата при мониторинге молодых лесных насаждений / Д. Н. Демидов // *Лесотехнический журнал*. 2021; 11 (4): 100–111. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/9>.
12. Кабонен А. В., Иванова Н. В. Оценка биометрических характеристик деревьев по данным наземного lidar и разносезонной аэрофотосъемки в искусственных насаждениях // *Nature Conservation Research. Заповедная наука*. 2023; 8 (1): 64-83. DOI: <https://dx.doi.org/10.24189/ncr.2023.005>.
13. Низаметдинов Н.Ф., Моисеев П.А., Воробьев И.Б. Лазерное сканирование и аэрофотосъемка с БПЛА в исследовании структуры лесотундровых древостоев Хибин // *Известия вузов. Лесной журнал*. 2021; 4: 9–22. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-4-9-22>.
14. Gao Q., Kan J. Automatic forest DBH measurement based on structure from motion photogrammetry // *Remote Sensing*. 2022; 9: 2064. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14092064>
15. Singh A. et al. An approach for tree volume estimation using RANSAC and RHT algorithms from TLS dataset // *Applied Geomatics*. 2022; 4:785-794. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12518-022-00471-x>.
16. Salehi, Bahram & Jarahizadeh, Sina & Sarafraz, Amin. An Improved RANSAC Outlier Rejection Method for UAV-Derived Point Cloud. *Remote Sensing*. 2022; 14: 4917. DOI: <http://doi.org/10.3390/rs14194917>.
17. Yan, Guohang & He, Feiyu & Shi, Chunlei & Cai, Xinyu & Li, Yikang. Joint Camera Intrinsic and LiDAR-Camera Extrinsic Calibration. 2023; 11446-11452. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.13708>.
18. Muhovič Jon, Pers Janez. Joint Calibration of a Multimodal Sensor System for Autonomous Vehicles. *Sensors*. 2023; 23: 5676. DOI: <http://doi.org/10.3390/s23125676>.
19. Zhu Y., Li C., Zhang Y. Online camera-lidar calibration with sensor semantic information // *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2020; 970-4976. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICRA40945.2020.9196627>
20. Huang, Biao & Zou, Shiping. (2022). A New Camera Calibration Technique for Serious Distortion. *Processes*. 2023; 10, 488. DOI: <http://doi.org/10.3390/pr10030488>.

21. Huang B. et al. A fast and flexible projector-camera calibration system //IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2020; 3: 1049-1063. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASE.2020.2994223>
22. Ly, Bao & Dyer, Ethan & Feig, Jessica & Chien, Anna & Bino, Sandra. (2020). Research Techniques Made Simple: Cutaneous Colorimetry: A Reliable Technique for Objective Skin Color Measurement. The Journal of investigative dermatology. 2020; 140: 3-12. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jid.2019.11.003>.
23. Dong, Lili & Zhang, Weidong & Xu, Wenhai. (2022). Underwater image enhancement via integrated RGB and LAB color models. Signal Processing Image Communication. 2022; 104: 116684. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.image.2022.116684>.
24. Abdel-Hamid, Lamiaa. Glaucoma detection using statistical features: Comparative study in RGB, HSV and CIEL*a*b* color models. 2018; 110692V DOI: <http://doi.org/10.1117/12.2524215>.
25. Liu, Kangcheng & Cao, Muqing. (2023). DLC-SLAM: A Robust LiDAR-SLAM System With Learning-Based Denoising and Loop Closure. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2023; 5: 2876-2884 DOI: <http://doi.org/10.1109/TMECH.2023.3253715>.
26. Lv, Jiajun & Lang, Xiaolei & Xu, Jinhong & Wang, Mengmeng & Liu, Yong & Zuo, Xingxing. (2023). Continuous-Time Fixed-Lag Smoothing for LiDAR-Inertial-Camera SLAM. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2023; 4: 2259-2270. DOI: <http://doi.org/10.1109/TMECH.2023.3241398>.
27. Ren, Yujuan & Li, Tianzi & Xu, Jikun & Hong, Wenwen & Zheng, Yanchao & Fu, Biao. (2021). Overall Filtering Algorithm for Multiscale Noise Removal From Point Cloud Data. IEEE Access. 2021; 9: 110723-110734. DOI: <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3097185>.
28. Boslim, N & Abdul Shukor, Shazmin & Isa, S & Wong, R. (2021). Performance analysis of different classifiers in segmenting point cloud data. Journal of Physics: Conference Series. 2021; 2107: 012003. DOI: <http://doi.org/10.1088/1742-6596/2107/1/012003>.

References

1. Kabonen, Alexey & Ivanova, Natalya. Tree attribute assessment in urban greenwood using ground-based LiDAR and multiseasonal aerial photography data. Nature Conservation Research. 2023; 8: 64-83. DOI: <http://doi.org/10.24189/ncr.2023.005>.
2. Yang B., Haala N., Dong Z. Progress and perspectives of point cloud intelligence //Geo-spatial Information Science. – 2023. – C. 1-17. DOI: <http://doi.org/10.1080/10095020.2023.2175478>.
3. Kuželka K., Marušák R., Surový P. Inventory of close-to-nature forest stands using terrestrial mobile laser scanning //International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2022; 115:103104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103104>
4. Pires, Raul & Olofsson, Kenneth & Persson, Henrik & Lindberg, Eva & Holmgren, Johan. (2022). Individual tree detection and estimation of stem attributes with mobile laser scanning along boreal forest roads. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2022; 187: 211-224. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.03.004>.
5. Zhang, Yupan & Tan, Yiliu & Onda, Yuichi & Hashimoto, Asahi & Gomi, Takashi & Chiu, Chenwei & Inokoshi, Shodai. (2023). A tree detection method based on trunk point cloud section in dense plantation forest using drone LiDAR data. Forest Ecosystems. 2023; 10: 100088. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.fecs.2023.100088>.
6. Dai, Mingrui & Li, Guohua. (2023). Soft Segmentation of Terrestrial Laser Scanning Point Cloud of Forests. Applied Sciences. 2023; 13: 6228. DOI: <http://doi.org/10.3390/app13106228>.
7. Krassnitzer, Ralf & Nothdurft, Arne & Ritter, Tim & Tockner, Andreas & Erber, Gernot & Kühmaier, Martin & Hönlgsberger, Ferdinand & Varch, Thomas & Holzinger, Andreas & Stampfer, Karl & Gollob, Christoph. Measurement of Individual Tree Parameters with Carriage-Based Laser Scanning in Cable Yarding Operations. Croatian journal of forest engineering. 2023; 2: 44 DOI: <http://doi.org/10.5552/crojfe.2023.2252>.

8. Gollob, Christoph & Ritter, Tim & Wassermann, Clemens & Nothdurft, Arne. (2019). Influence of Scanner Position and Plot Size on the Accuracy of Tree Detection and Diameter Estimation Using Terrestrial Laser Scanning on Forest Inventory Plots. *Remote Sensing*. 2019; 11: 1602. DOI: <http://doi.org/10.3390/rs11131602>.
9. Liang X. et al. International benchmarking of terrestrial laser scanning approaches for forest inventories // *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*. 2018; 144: 137-179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.06.021>
10. Pokoeva M.V., Yarovslavcev A.M. Ekologicheskie issledovaniya smeshannyh nasazhdenij metodami distancionnogo zondirovaniya // *Lesnoj vestnik / Forestry Bulletin*, 2020. T. 24. № 3. S. 33–38. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-3-33-38
11. Demidov D. N. Issledovanie algoritma ocenki parametrov predpoletnoj orientacii sredstv upravleniya bespilotnogo letatel'nogo apparata pri monitoringe molodyh lesnyh nasazhdenij / D. N. Demidov // *Lesotekhnicheskij zhurnal*. – 2021. – T. 11. – № 4 (44). – S. 100–111. – Bibliogr.: s. 108–111 (25 nazv.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/9>.
12. Kabonen A. V., Ivanova N. V. Ocenka biometricheskikh harakteristik derev'ev po dannym nazemnogo lidar i raznosezonnnoj aerofotos"emki v iskusstvennyh nasazhdeniyah // *Nature Conservation Research. Zapovednaya nauka*. – 2023. – T. 8. – №. 1. – S. 64-83. DOI: <https://dx.doi.org/10.24189/ncr.2023.005>
13. Nizametdinov N.F., Moiseev P.A., Vorob'ev I.B. 2021. Lazernoe skanirovanie i aerofotos"emka s BPLA v issledovanii struktury lesotundrovyyh drevostoev Hibin // *Izvestiya vuzov. Lesnoj zhurnal*. №4. S. 9–22. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-4-9-22>
14. Gao Q., Kan J. Automatic forest DBH measurement based on structure from motion photogrammetry // *Remote Sensing*. 2022; 9: 2064. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14092064>
15. Singh A. et al. An approach for tree volume estimation using RANSAC and RHT algorithms from TLS dataset // *Applied Geomatics*. 2022; 4:785-794. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12518-022-00471-x>
16. Salehi, Bahram & Jarahizadeh, Sina & Sarafraz, Amin. An Improved RANSAC Outlier Rejection Method for UAV-Derived Point Cloud. *Remote Sensing*. 2022; 14: 4917. DOI: <http://doi.org/10.3390/rs14194917>.
17. Yan, Guohang & He, Feiyu & Shi, Chunlei & Cai, Xinyu & Li, Yikang. Joint Camera Intrinsic and LiDAR-Camera Extrinsic Calibration. 2023; 11446-11452. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.13708>
18. Muhovič Jon, Pers Janez. Joint Calibration of a Multimodal Sensor System for Autonomous Vehicles. *Sensors*. 2023; 23: 5676. DOI: <http://doi.org/10.3390/s23125676>.
19. Zhu Y., Li C., Zhang Y. Online camera-lidar calibration with sensor semantic information // *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2020; 970-976. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICRA40945.2020.9196627>
20. Huang, Biao & Zou, Shiping. (2022). A New Camera Calibration Technique for Serious Distortion. *Processes*. 2023; 10, 488. DOI: <http://doi.org/10.3390/pr10030488>.
21. Huang B. et al. A fast and flexible projector-camera calibration system // *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2020; 3: 1049-1063. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASE.2020.2994223>
22. Ly, Bao & Dyer, Ethan & Feig, Jessica & Chien, Anna & Bino, Sandra. (2020). Research Techniques Made Simple: Cutaneous Colorimetry: A Reliable Technique for Objective Skin Color Measurement. *The Journal of investigative dermatology*. 2020; 140: 3-12. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jid.2019.11.003>.
23. Dong, Lili & Zhang, Weidong & Xu, Wenhai. (2022). Underwater image enhancement via integrated RGB and LAB color models. *Signal Processing Image Communication*. 2022; 104: 116684. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.image.2022.116684>.
24. Abdel-Hamid, Lamiaa. Glaucoma detection using statistical features: Comparative study in RGB, HSV and CIEL*a*b* color models. 2018; 110692V DOI: <http://doi.org/10.1117/12.2524215>.
25. Liu, Kangcheng & Cao, Muqing. (2023). DLC-SLAM: A Robust LiDAR-SLAM System With Learning-Based Denoising and Loop Closure. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2023; 5: 2876-2884 DOI: <http://doi.org/10.1109/TMECH.2023.3253715>.

26. Lv, Jiajun & Lang, Xiaolei & Xu, Jinhong & Wang, Mengmeng & Liu, Yong & Zuo, Xingxing. (2023). Continuous-Time Fixed-Lag Smoothing for LiDAR-Inertial-Camera SLAM. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2023; 4: 2259-2270. DOI: <http://doi.org/10.1109/TMECH.2023.3241398>.

27. Ren, Yujuan & Li, Tianzi & Xu, Jikun & Hong, Wenwen & Zheng, Yanchao & Fu, Biao. (2021). Overall Filtering Algorithm for Multiscale Noise Removal From Point Cloud Data. IEEE Access. 2021; 9: 110723-110734. DOI: <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3097185>.

28. Boslim, N & Abdul Shukor, Shazmin & Isa, S & Wong, R. (2021). Performance analysis of different classifiers in segmenting point cloud data. Journal of Physics: Conference Series. 2021; 2107: 012003. DOI: <http://doi.org/10.1088/1742-6596/2107/1/012003>.

Сведения об авторах

✉ *Рогачев Дмитрий Игоревич* – ассистент кафедры транспортно-технологические средства и оборудование лесного комплекса, Мытищинского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», ул. 1-ая Институтская, д. 1, г. Мытищи, Российская Федерация, 141005, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7807-5294>, e-mail: rogachevdi@bmstu.ru.

Козлов Иван Вячеславович – ассистент кафедры транспортно-технологические средства и оборудование лесного комплекса, Мытищинского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», ул. 1-ая Институтская, д. 1, г. Мытищи, Российская Федерация, 141005, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7143-0006>, e-mail: kozloviv@bmstu.ru.

Клубничкин Владислав Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент кафедры транспортно-технологические средства и оборудование лесного комплекса, Мытищинского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», ул. 1-ая Институтская, д. 1, г. Мытищи, Российская Федерация, 141005, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1231-8185>, e-mail: vkclubnichkin@gmail.com.

Information about the authors

✉ *Dmitry I. Rogachev* – assistant of the Department of Transport and Technological Means and Equipment of the Forest Complex, Mytishchi Branch of the Bauman Moscow State Technical University, 1st Institutskaya str., 1, Mytishchi, Russian Federation, 141005, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7807-5294>. e-mail: rogachevdi@bmstu.ru

Ivan V. Kozlov – assistant of the Department of Transport and Technological Means and Equipment of the Forest Complex, Mytishchi Branch of the Bauman Moscow State Technical University, 1st Institutskaya str., 1, Mytishchi, Russian Federation, 141005, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7143-0006>, e-mail: kozloviv@bmstu.ru.

Vladislav E. Klubnichkin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport and Technological Means and Equipment of the Forest Complex, Mytishchi Branch of the Bauman Moscow State Technical University, 1st Institutskaya str., 1, Mytishchi, Russian Federation, 141005, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1231-8185>, e-mail: vkclubnichkin@gmail.com.

✉ Для контактов/Corresponding author

Article

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/9>

УДК 630 : (674(075)+684.4)



Investigation of adhesive bond strength when facing furniture boards with flexible stone veneer

Larisa V. Ponomarenko¹, ponomarenko.lara@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-1353-2033>

Ekaterina V. Kantieva¹, ekantieva@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-8352-1941>

Anastasiya S. Kireeva², nastyakir.vrn@mail.ru <https://orcid.org/0009-0008-0747-7668>

¹Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh city, 394087, Russian Federation

²La Sapienza University of Rome, Piazzale Aldo Moro 00185 – Roma, RM, Italia

Abstract

Stone veneer has been known for a long time. But mostly it has been used as a finishing material, which is widely applied in decorating the outer surfaces of buildings and facilities. Stone veneer is a thin cut of natural stone - slate, which is applied to fiberglass or textiles. The thickness of the veneer is in the range of 2-3 mm. Stone veneer is available in the form of rolls or tiles. Due to its flexibility, it can be used to refine surfaces that have angles and small radius of curvature. The flexibility of stone veneer is a unique property, since natural stone is not flexible. In today's world stone veneer is trying to find new fields of application. This material is used not only in interior and exterior designs, but also as a decorative coating of furniture panels. In this work we have established the possibility of wood board materials facing by stone veneer using standard technologies and the most common adhesives used in our country, such as urea-formaldehyde resin and polyvinyl acetate dispersion.

Keywords: *stone veneer, cladding modes, glue, adhesive joint strength, glue seepage*

Funding: this research received no external funding.

Acknowledgments: the authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this paper/

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

For citation: Ponomarenko L. V., Kantieva E. V., Kireeva A. S. Adhesive bond strength when facing furniture boards with flexible stone veneer. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No.4 (52), part 1, pp. 140-157. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/9>.

Received 24.10.2023. *Revised* 01.12.2023. *Accepted* 02.12.2023. *Published online* 29.12.2023.

Оригинальная статья

Исследование прочности клеевого соединения при облицовывании щитовых деталей мебели каменным шпоном

Лариса В. Пономаренко¹, ponomarenko.lara@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-1353-2033>

Екатерина В. Кантиева¹, ekantieva@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-8352-1941>

Анастасия С. Киреева², nastyakir.vrn@mail.ru <https://orcid.org/0009-0008-0747-7668>

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Россия

²Сапиенца Университет Рима, площадь Альдо Моро, 5, 00185, Италия

Каменный шпон известен достаточно давно. Но в основном он использовался как отделочный материал, который широко применяется для декорирования наружных поверхностей зданий и сооружений. Каменный шпон представляет собой тонкий срез природного камня - сланца, который наносится на стекловолокно или текстиль. Толщина шпона находится в пределах всего 2-3 мм. Каменный шпон выпускается в виде рулонов или плитки. Из-за гибкой основы, каменным шпоном можно облагораживать поверхности, имеющие углы и небольшие радиусы кривизны. Гибкость каменного шпона является уникальным свойством, так как природный камень в природе не изгибается. В современном мире каменный шпон находит новые зоны применения. Дизайнеры используют этот материал не только в интерьере внутри и снаружи помещений, но и как декоративное покрытие щитовых деталей мебели. В своей работе мы установили возможность облицовывания плитных древесных материалов каменным шпоном по типовым технологиям и самым распространенными клеями, которые используются в нашей стране, такими как карбамидоформальдегидная смола и поливинилацетатная дисперсия.

Ключевые слова: каменный шпон, режимы облицовывания, клей, прочность клеевого соединения, просачивание клея

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Пономаренко Л. В. Исследование прочности клеевого соединения при облицовывании щитовых деталей мебели каменным шпоном / Л. В. Пономаренко, Е. В. Кантиева, А. С. Киреева // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 4 (52). – Ч. 1. – С. 140–157. – Библиогр.: с. 155–157 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/9>.

Поступила 24.10.2023. **Пересмотрена** 01.12.2023. **Принята** 02.12.2023. **Опубликована онлайн** 29.12.2023.

Introduction

Over recent years, the amount of forest resources on the planet, due to global warming and climate change, frequent fires and other disasters, has decreased. Russia, as the richest country in forest resources, is also experiencing difficulties in developing new areas of deforestation for industrial use, including furniture production. Resource depletion and environmental challenges have stimulated research into renewable and recyclable materials in the furniture industry [1-3]. Modern furniture is mostly made from wood-based board materials, which are clad with wood veneer or synthetic films [4]. Designers are looking for opportunities to use new facing materials that are not quite typical for furniture. Among them is flexible stone veneer [<http://www.tg-stone.ru/shpon/> (date of access: 15.11.2023); <http://www.samplestone.ru/mebel-iz-kamennogo-shpona/> (date of access: 15.11.2023); <http://www.niasam.ru/> (date of access: 15.11.2023)].

Stone veneer, like many other loud discoveries, was designed by accident, during a stone countertop repairing process in Germany in the late 20th century. It was possible to separate a thin layer of stone from a massive slate. Further, as a result of long experiments, a modern version of stone veneer was obtained. The material completely mimics natural stone.

The main advantage of stone veneer is its decorative effect, due to the large number of colors and unique natural stone pattern [5]. We also note high water and temperature resistances, eco-friendliness, flexibility, durability. All these properties make it possible to use this material for external and internal finishing of surfaces of complex configuration. Natural stone veneer goes well with other materials such as wood, leather, wallpaper, concrete, ceramic, glass and metal, which allows its using for indoor wall and floor coverings, fireplace facades, bathroom surfaces, ceilings, kitchen splash backs. Transparent fiberglass and a light source

allow to create amazing stone patterns; such stone veneer is used including for the manufacture of unique lampshades for lamps and light panels [6]. The cotton base allows to produce a highly flexible stone veneer which expands the possibilities of its practical use. Such stone veneer is used in furniture manufacturing, car tuning, decorating of clothing and accessories.

New generation stone veneer is a "sandwich" consisting of a substrate, adhesive and stone layer. The substrate is fiberglass, transparent fiberglass and cotton. The type of substrate is mainly determined by the properties of stone veneer and its field of application.

The popularity of stone veneer in interior design is very high, thus many designers wish to use it also in furniture design [7,8]. Stone veneer manufacturers provide recommendations on the use of certain types of adhesives for interior decoration on individual projects. There are no recommendations on the use of stone veneer for facing furniture panels. Ceramide - and melamine-formaldehyde adhesives are widely used in furniture production. Due to the increasing requirements for the environmental friendliness of materials in furniture production, new multifunctional non-toxic adhesives based on polyurethane and natural rubber are currently being developed [9-11], as well as modified melamine-formaldehyde resins [12]. These materials have not yet been sufficiently studied and have not found wide application. In that context, it would be interesting to consider serial use of stone veneer in furniture manufacturing, as well as the possibility of using standard pressure equipment, traditional adhesive systems [13-16], adhesive application methods and its consumption.

The purpose of the work is to determine the effect of the type and consumption of glue on the strength of the adhesive joint when using flexible stone veneer [17-19] as a facing material for furniture blanks made of wood-based materials under different operating conditions [20].

Materials and methods

Particleboard (chipboard) was used as the base for cladding according to EN 312:2010 [Particleboards - Specifications; German version EN 312:2010 Spanplatten - Anforderungen] 16 mm thick, 750 kg/m³ density. Slate-Lite stone veneer with a cotton substrate was used as facing layer, Tytan Hydro Fix Professional

assembly adhesive – as a binder, KF-Zh urea formaldehyde resin (UFR), PVA DE 51/15V.

Tytan Hydro Fix is a water-based multipurpose assembly adhesive for working with fire hotspots, manufactured by Libra sp.z.o.o. (Poland). Technical characteristics: mass fraction of dry residue is 52%, application temperature 10-30 °C, operating temperature -20+60 °C.

Resin KF-Zh - urea-formaldehyde resin of high vitality according to GOST 14231 [Smoly karbami-doformal'degidnye. Tekhnicheskie usloviya [Carbamide-formaldehyde resins. Technical conditions] – 1989-07-01.]. Technical characteristics: mass fraction of dry residue is 67%, relative viscosity at (20.0 + 0.5) 0C, according to the VZ-246 viscometer with a nozzle diameter of 6 mm 35-50 s, pH 7.5-8.7, gelatinization time at 100 °C 40-65 s, at 20 °C – 8 hours.

DE 51/15V is a polyvinyl acetate (PVA) dispersion plasticized according to TU 2241-010-25031183-06 [These technical conditions apply to the glue PVA DE 51/15 V]. (in Russian)]. Produced by "Edos" (Russia). Specifications: dry residue mass fraction 51±1%, conventional viscosity according to a standard VMS cup 10-40 s, pH 4-6.5. The formulations of adhesive solutions are presented in table 1.

During the experimental part we produced a set of works on chipboard facing with stone veneer using cold and hot methods according to standard technological modes and applying different adhesive formulations. Technological modes of chipboard facing are shown in table 2. The size of the faced boards is 300×200 mm, the size of the facing layer with an allowance is 310×210 mm.

Since stone veneer was originally used for interior decoration, we applied the following formula to calculate the adhesive consumption for the cold method:

$$V = S \cdot t \cdot R \cdot K \quad (1)$$

where V is the adhesive volume, l; S – the area of application surface, m²; t – the thickness of the adhesive layer, m; and K – the number of adhesive layers.

For Tytan adhesive, the consumption according to formula 1 was 400 g/m². However, the practical application of this consumption led to the extrusion during the hot pressing, and therefore the adhesive consumption was adjusted from 200 to 300 g/m². For other types of adhesives, the consumption varied from 180 to 220 g/m².

Table 1

Compositions of adhesive solutions

Таблица 1

Рецепт рабочих растворов клеев

№ Formulation Рецепт клея	Composition of adhesive solutions Состав рабочего раствора клея, м.ч.				
	Tytan Тытан	KF-Zh КФ-Ж	PVA DE 51/15V ПВА ДЭ 51/15 В	Ammonium- chloride Хлористый ам- моний	10% oxalic acid- based solution 10-% водный раствор щавел- ливой кислоты
1	100	-	-	-	-
2	-	100	-	-	6
3	-	100	-	1	-
4	-	75	25	-	6
5	-	75	25	1	-

Источник: собственные вычисления автор(ов)

Source: own calculations

Table 2

Technological modes of facing

Таблица 2

Технологические режимы облицовывания

Technological modes of facing Техно- логические режимы облицовывания	Formulation Рецепты клеев				
	1	2	3	4	5
Adhesive consumption, g/m ² Расход клея, г/м ²	200-400	180-220	180-220	180-220	180-220
Specific pressure, МПа Удельное давление, МПа	0,2	0,2	0,7-1	0,2	0,7-1
Adhesion duration, min Продолжи- тельность склеивания, мин.	120	35-40	3	90-120	3
Board temperature in the press, °C Температура плит прессы, °C	20	20	120	20	120
Holding after depressurization, h Выдержка после снятия давления, час	48	18-24	18-24	18-24	18-24
Room temperature, ≤ °C Темпера- тура в помещении, не менее °C	18	18	18	18	18

Источник: собственные вычисления автор(ов)

Source: own calculations

Samples of 100×100 mm were used to determine the possible adhesive absorption by the stone veneer basis. The samples were weighted on the scales with a weighing accuracy of 0.01 g, the adhesive was applied in an even layer and kept for 60 s. Excess adhesive was removed and the surface was dried with filter paper.

Next, the samples were weighed again and the amount of absorbed adhesive was determined by the formula:

$$Q = m_k - m_n, \quad (2)$$

where, m_k is the mass of the sample with the adhesive absorbed into the sample; m_n – the initial mass of the sample.

To determine the adhesive leakage, a package was assembled: a facing layer of stone veneer is laid on the base, and filter paper is placed on top. Next, the package was placed in a press. Paper was removed from the finished sample, and the absolute leakage area were determined from the adhered pieces by applying glass with a grid. The relative seepage area was determined by dividing the absolute seepage area by the sample area.

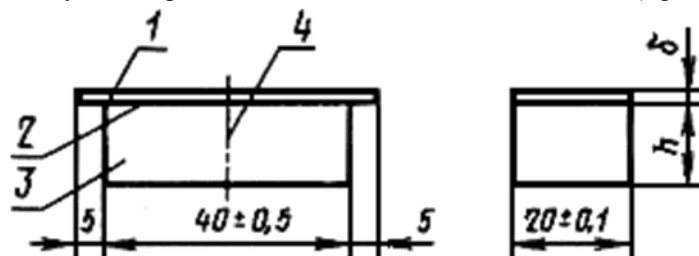


Figure 1. The shape and dimensions of the sample:

1 – flexible stone veneer, 2 – adhesive layer, 3 – chipboard base, 4 – punch line

Рисунок 1 – Форма и размеры образца:

1 - каменный шпон, 2 – клеевой слой, 3 – основание ДСтП, 4 – линия для установки пуансона

Source: GOST 15867-79 *Detali i izdeliya iz drevesiny i drevesnykh materialov. Metody opredeleniya prochnosti kleeвого soedineniya na neravnomernyj otrыв oblicovochnykh materialov*. [Details and products made of wood and wood materials. Methods for determining the strength of the adhesive joint for uneven separation of facing materials]. – Введ. 1980-07-01. - М.: ИМК Izdatel'stvo standartov [Publishing House of Standards], 1980 г. – 8 p. (in Russian)

Источник: ГОСТ 15867-79 «Детали и изделия из древесины и древесных материалов. Методы определения прочности клеевого соединения на неравномерный отрыв облицовочных материалов». – Введ. 1980-07-01. - М.: ИМК Издательство стандартов, 1980 г. – 8 с.

To determine the strength of the samples, an MP-0.5 tensile strength testing machine was used (maximum load 50000 N, manufacturer Ivanovskij ZIP, Russia). The sample is loaded at a constant travel speed of 30 mm/min. The test instrument is shown in the Figure 2.

The strength of the adhesive bond during the uneven separation test (kN/m) was determined by the formula

$$g = \frac{P}{2b}, \quad (3)$$

where P is the breaking load, kN; b – the sample width, m.

Strength tests of the adhesive bond for uneven separation were carried out according to GOST 15867. Sample workpieces are made individually or cut in the form of rectangular bars with a length that is a multiple of the length of the sample with sawing allowances. The thickness of the base is equal to the thickness of the chipboard. Overhangs of stone veneer relative to the base were 5 mm on each side (figure 1).

The tests were carried out in three stages. In the first stage - immediately after the end of the technological exposure of the samples after storage at a temperature of $(18 \pm 5)^\circ\text{C}$ and relative air humidity $(65 \pm 10)\%$. In the second and third stages, the determination of the strength and water resistance of adhesive bonds was carried out according to European standards: DIN EN 204, 205. According to EN 204, 205 adhesive bonds must satisfy specific requirements for the relevant load group. We have considered the load groups D1 and D2 (table 3).

The minimum values of adhesive bond strength according to DIN EN 204 are shown in table 4.

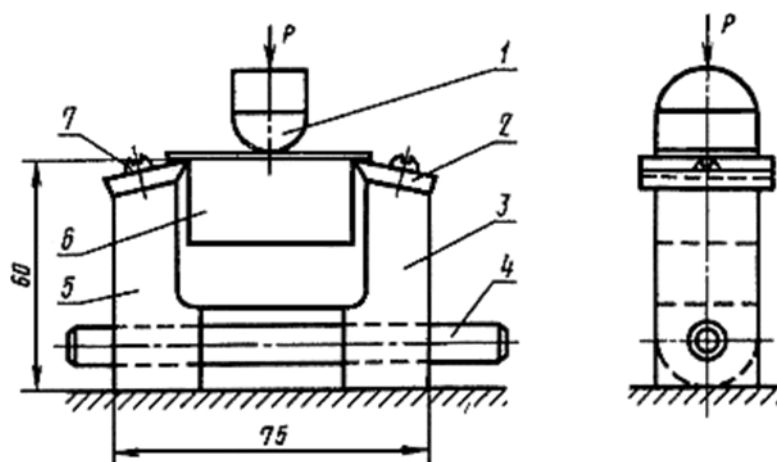


Figure 2. Instrument for determining the strength on uneven separation: 1 – punch, 2 – knife, 3 – self-aligning support with cylindrical base, 4 – rod, 5 – support with a flat base, 6 – sample, 7 – M5 screw

Рисунок 2. Приспособление для определения прочности на неравномерный отрыв: 1 – пуансон, 2 – нож, 3 – самоустанавливающаяся опора с цилиндрическим основанием, 4 – стержень, 5 – опора с плоским основанием, 6 – образец, 7 – винт М5

Источник: ГОСТ 15867-79 «Детали и изделия из древесины и древесных материалов. Методы определения прочности клеевого соединения на неравномерный отрыв облицовочных материалов». – Введ. 1980-07-01. - М.: ИМК Издательство стандартов, 1980 г. – 8 с.

Source: GOST 15867-79 Detali i izdeliya iz drevesiny i drevesnykh materialov. Metody opredeleniya prochnosti kleeвого soedineniya na neravnomernyj otrыв oblicovochnykh materialov. [Details and products made of wood and wood materials. Methods for determining the strength of the adhesive joint for uneven separation of facing materials]. – Введ. 1980-07-01. - М.: ИМК Izdatel'stvo standartov [Publishing House of Standards], 1980 г. – 8 p. (in Russian)

Table 3

Description of load groups

Таблица 3

Описание групп нагружаемости

Load group Группа нагрузок	Areas of application Примеры для областей применения
D1	In a room with temperature briefly above 50 °C and humidity of max 15% В помещении, причем температура только кратковременно составляет более 50° С и влажности max 15%
D2	Indoors, with short-term exposure to running water or condensate and/or short-term high air humidity with an increase in humidity up to 18% В помещении, с кратковременным воздействием стекающей водой или конденсатом и/или кратковременной высокой влажностью воздуха с повышением влажности до max 18 %

Source: Klassifikaciya termoplastichnykh kleeв dlya drevesiny dlya primeneniya ne v proizvodstve konstrukcionno-go silovogo brusa [Classification of thermoplastic adhesives for wood for use not in the production of structural power beams]: DIN EN 204-2001. – 01.05.2001. – CEN, 2001. – 5 p. (in Russian); Klei. Klei nekonstrukcionnye dlya dereva. Opredelenie prochnosti skleivaniya prodol'nykh skleek ispytaniem na razryv [Adhesives. Non-structural adhesives for wood. Determination of the bonding strength of longitudinal glues by a tear test]: DIN EN 205–2003. – 21.11.2002. – CEN, 2003. – 10 p. (in Russian)

Источники: Классификация термопластичных клеев для древесины для применения не в производстве конструкционного силового бруса: DIN EN 204-2001. – Введ. 01.05.2001. – CEN, 2001. – 5 с.: Klei. Klei nekonstrukcionnye dlya dereva. Opredelenie prochnosti skleivaniya prodol'nykh skleek ispytaniem na razryv: DIN EN 205–2003. – Введ. 21.11.2002.

Minimum values of adhesive bond strength according to DIN EN 204, 205

Таблица 4

Минимальные значения прочности клеевого соединения по DIN EN 204, 205

Exposure sequence Последователь- ность экспозиции	Type and duration Вид и продолжи- тельность	Load groups/adhesive bond strength N/mm ² Группы нагрузок/прочность клеевого соединения Н/мм ²	
		D1	D2
1	7 days ¹ in normal climate ² 7 дней ¹⁾ при нормальном климате ²⁾	>10	≥10
2	7 days ¹ in normal climate ² , 3 h in cold water ³ , 7 days in normal climate ² 7 дней ¹⁾ при нормальном климате ²⁾ , 3 часа в холодной воде ³⁾ , 7 дней при нор- мальном климате ²⁾	-	≥8

¹day – 24 h.
²Room temperature of 23±2 °C and relative air humidity of 50±5%.
³Water is the same temperature as the environment.
 Примечание: 1)-1 день – 24 часа; 2)температура в помещении (23±2)⁰ С и относительная влажность воздуха (50±5)%; 3)вода должна иметь ту же температуру, что и окружающая среда

Sources: Klassifikaciya termoplastichnyh kleev dlya drevesiny dlya primeneniya ne v proizvodstve konstrukcionno-go silovogo brusa [Classification of thermoplastic adhesives for wood for use not in the production of structural power beams]: DIN EN 204-2001. – 01.05.2001. – CEN, 2001. – 5 p. (in Russian); Klei. Klei nekonstrukcionnye dlya dereva. Opredelenie prochnosti skleivaniya prodol'nyh skleek ispytaniem na razryv [Adhesives. Non-structural adhesives for wood. Determination of the bonding strength of longitudinal glues by a tear test]: DIN EN 205-2003. – 21.11.2002. – CEN, 2003. – 10 p. (in Russian)

Источники: Классификация термопластичных клеев для древесины для применения не в производстве конструкционного силового бруса: DIN EN 204-2001. – Введ. 01.05.2001. – CEN, 2001. – 5 с.: Klei. Klei nekonstrukcionnye dlya dereva. Opredelenie prochnosti skleivaniya prodol'nyh skleek ispytaniem na razryv: DIN EN 205-2003. – Введ. 21.11.2002.

Results

The absorbency of the glue by the base of the stone veneer was determined on 10 samples obtained from different sections of the sheet. Figure 3 shows that the base of stone veneer under the influence of adhesives and water can plasticize, soften and absorb a small amount of adhesive and water. As we are considering the use of traditional adhesives when facing facades and furniture walls with stone veneer, we conclude that with small façade area (about 1 m²), recalculation of the adhesive, based omits absorption, is not necessary. If the area of facades or other furniture details is large, it is recommended to increase the adhesive consumption, based on its absorption into the stone veneer base.

After holding the samples in a cold press, we noticed that some of them partially acquired a darker cooler. It is assumed that stone does not allow moisture

to pass through, thus adhesive leakage onto the front side is highly unlikely. It is apparent that, when pressure is applied for the cold method, adhesive curing does not happen immediately, but within a certain time. The stone veneer production technology suggests the destruction of a massive stone beam. Microcracks forming in it and, at the moment of application of force, adhesive leaks onto them. It is an interesting fact that at the end of the technological exposure, the veneer dried out and returned to its original color. When exposed to hot presses, no leakage effect was observed. Obviously, it is due to the fact that the duration of the adhesive curing in hot presses is only a few minutes.

The leakage area and the relative leakage area on the front side during the cold method, depending on the brand and type of adhesive, are presented in table 5 and figure 4.

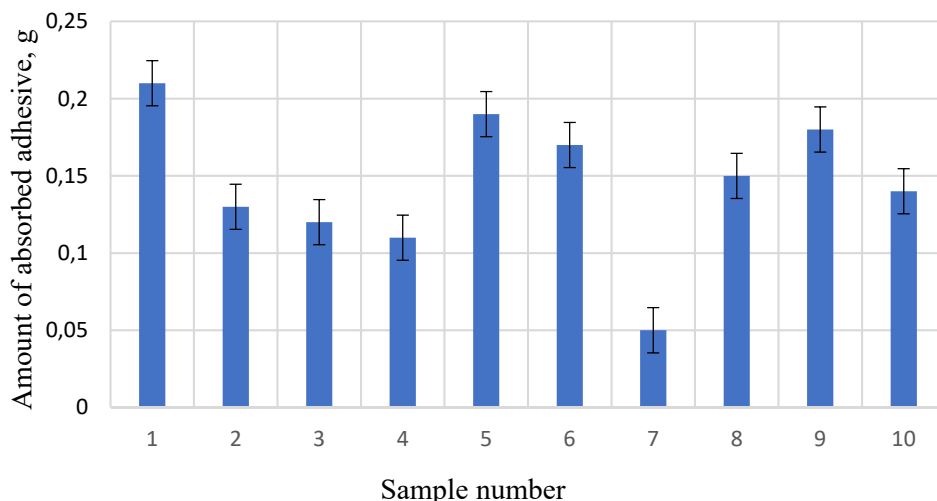


Figure 3. Adhesive absorption by the stone veneer base

Рисунок 3. Впитываемость клея основой каменного шпона

Source: author's results

Источник: собственные результаты авторов

When using the Tytan adhesive with an adhesive consumption of 200 g/m² no leakage was observed, with an increase in the adhesive consumption to 400 g/m² the leakage was very low and the average value of the relative leakage area was only 0,134 (table 4 Formulation 1/figure 3). It should also be noted that leakage was observed in only 30% of the samples. Almost the same leakage was shown by the use of resin KF-Zh-based adhesive – 0,133 (table 4 Formulation 2/figure 3). But

leakage was noted in 40% of the samples. For the combined adhesive (KF-L+PVA), the average value of the relative leakage area was 0.49 and 100% of the samples (table 4 Formulation 3/figure 3). This can be explained by the longer curing time of the adhesive in the cold state compared to hot method.

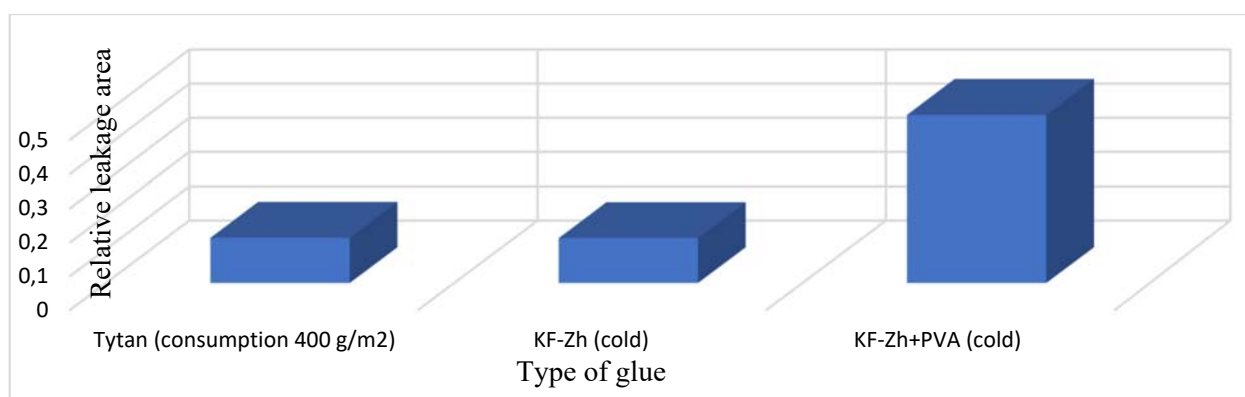


Figure 4. Glue seeping onto the front surface during cold bonding

Рисунок 4. Просачивание клея на лицевую поверхность для холодного способа склеивания

Source: author's results

Источник: собственные результаты авторов

Leakage area and relative leakage area

Таблица 5

Площадь просачивания и относительная площадь просачивания

Рецепт клея					
1 с расходом клея 400 г/м ²		2 с расходом клея 200 г/м ²		4 с расходом клея 200 г/м ²	
Площадь просачивания, см ²	Относительная площадь просачивания	Площадь просачивания, см ²	Относительная площадь просачивания	Площадь просачивания, см ²	Относительная площадь просачивания
1,07	0,134	3,63	0,133	3,95	0,493

Source: author's results

Источник: собственные результаты авторов

During the production of samples in order to determine the strength of the adhesive bond for uneven separation not all of the samples turned out to be suitable to perform tests. The percentage of suitable samples ranged from 50 to 70%. The rest of the samples had a very low adhesive strength. We assume that this result is due to the fact that the surface of the stone veneer has different thicknesses and at the time of load application in a flat press, the pressure exerted on the board was uneven. This resulted in the fact that those places where the pressure was weakened, the adhesive bond strength was very low.

The results of definition of adhesive bond strength for uneven separation for various adhesive formulations and modes from load groups are presented in figures 5-9.

Figure 5 allows to establish that after technological exposure (24 h) with load group D1 and at adhesive consumption of 200 and 300 g/m², the adhesive bond strength for uneven separation is within 3.25 kN/m. With an increase in the adhesive consumption up to 400 g/m², the strength not only does not increase, but, on the contrary, decreases. A large thickness of the cured adhesive layer leads to a large shrinkage, destruction and a

decrease in strength. After the load group D2, the adhesive bond strength for uneven separation at any adhesive consumption is approximately the same and is within 0.4 kN/m. This clearly demonstrates that exposure to water impacts negatively on the strength characteristics of the Tytan adhesive.

Figure 6 demonstrates that at the highest strength of the adhesive bond for uneven separation is observed after the load group D 1 at all adhesive consumptions, the maximum value, slightly more than 0.8 kN/m, falls on the adhesive consumption of 200 g/m². After technological exposure for 24 h, the strength at all adhesive consumptions is within 0.4 ... 0.6 kN/m, after load group D – 0.25 ... 0.3. We see that these figures are lower than for Tytan adhesive, but still sufficient for facing furniture facades.

As shown in figure 7, the correspondence between the strength of the adhesive layer for uneven separation after technological exposure and after the load group D1 and D2 is similar to the previous adhesive, but the average values are in a lower range. The highest strength value is achieved at an adhesive consumption of 200 g/m² and is 0.578 kN/m and load group D 1.

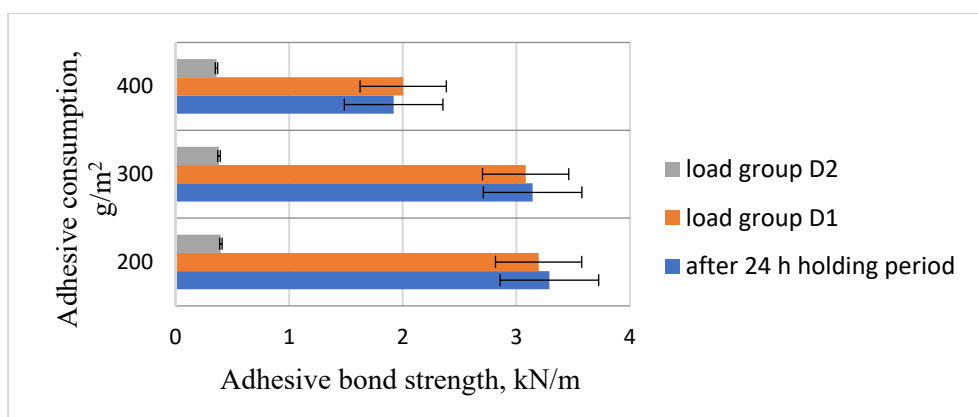


Figure 5. Dependence of adhesive bond strength for uneven separation on the consumption of Tytan adhesive

Рисунок 5. Зависимость прочности клеевого соединения от расхода клея Tytan

Source: author's results

Источник: собственные результаты авторов

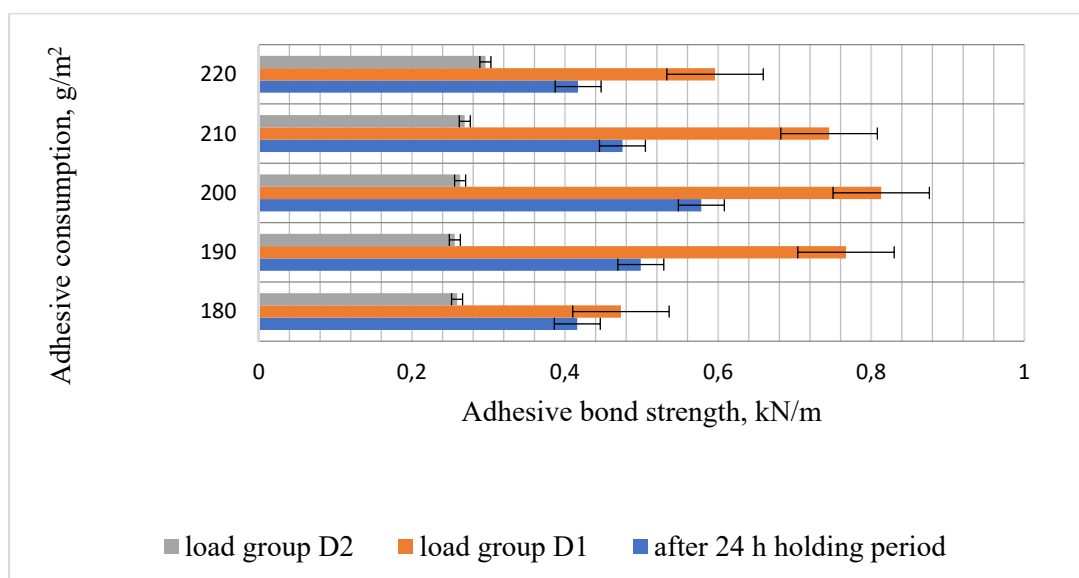


Figure 6. Dependence of the adhesive bond strength on the consumption of KF-Zh adhesive (cold method)

Рисунок 6. Зависимость прочности клеевого соединения от расхода клея КФ-Ж (холодный способ склеивания)

Source: author's results

Источник: собственные результаты авторов

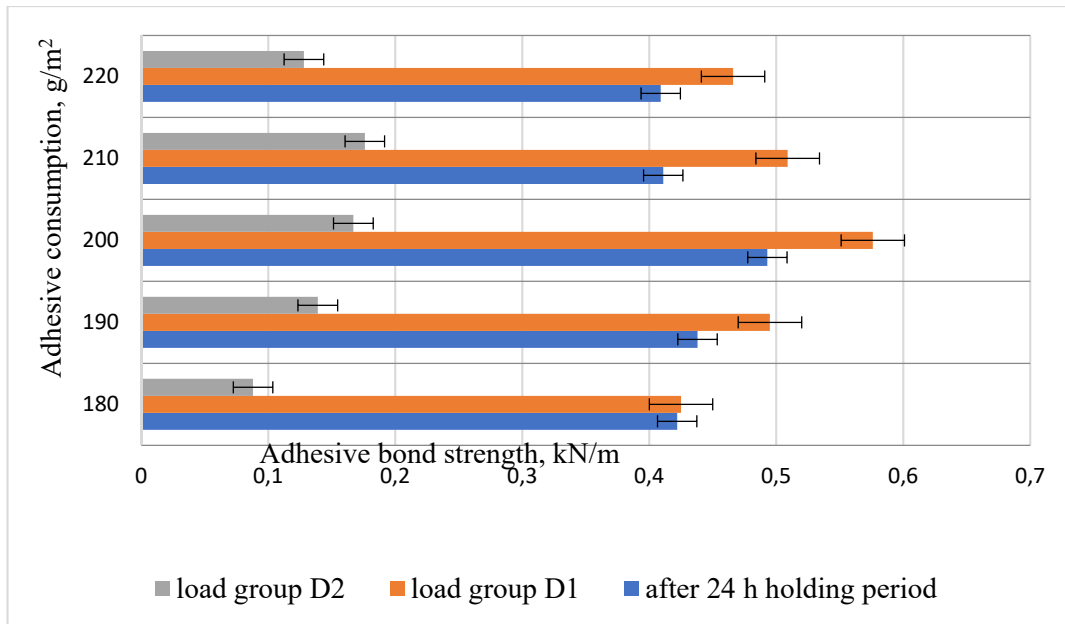


Figure 7. Dependence of the adhesive bond strength on the consumption of KF-Zh adhesive (hotmethod)

Рисунок 7. Зависимость прочности клеевого соединения от расхода клея КФ-Ж (горячий способ склеивания)
Source: author's results

Источник: собственные результаты авторов

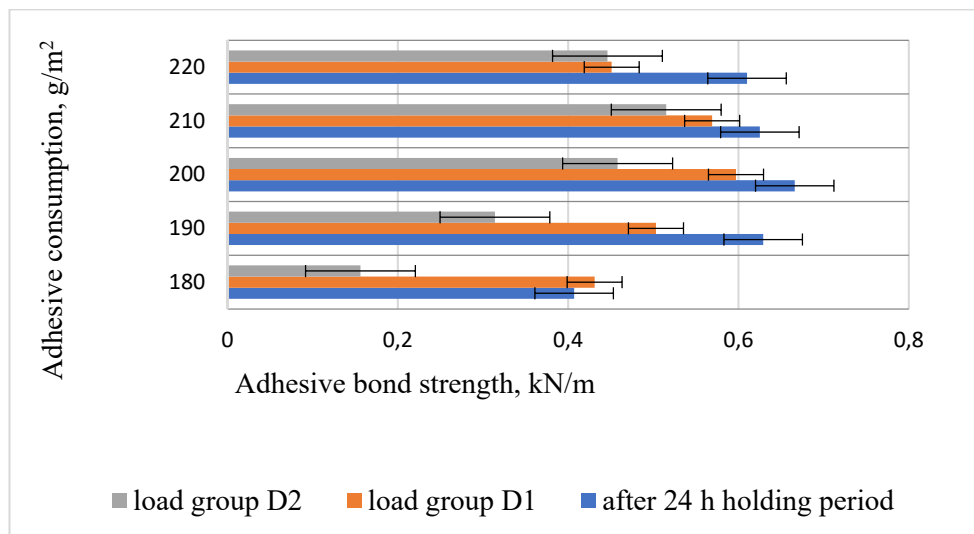


Figure 8. Dependence of the adhesive bond strength on the consumption of KF-Zh + PVA adhesive (cold method)

Рисунок 8. Зависимость прочности клеевого соединения от расхода клея КФ-Ж+ПВА (холодный способ склеивания)

Source: author's results

Источник: собственные результаты авторов

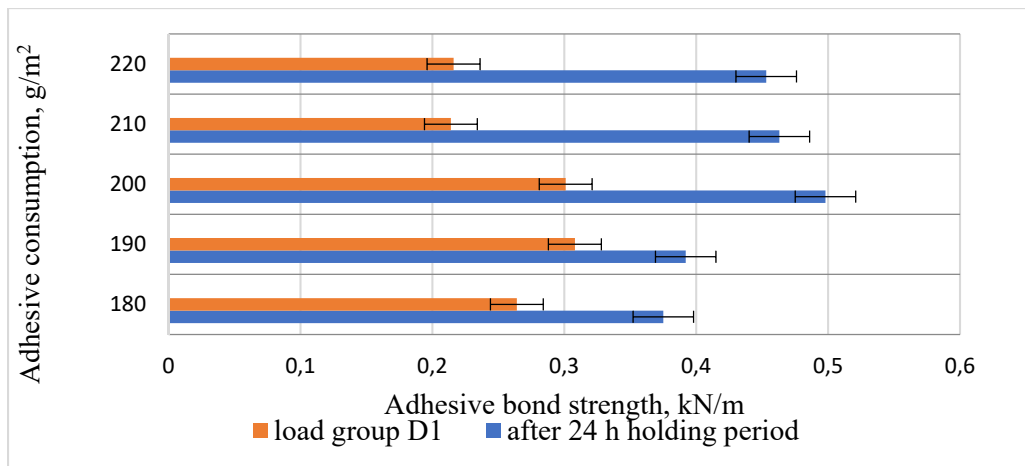


Figure 9. Dependence of the adhesive bond strength on the consumption of KF-Zh + PVA adhesive (hot method)
 Рисунок 9. Зависимость прочности клеевого соединения от расхода клея КФ-Ж+ПВА (горячий способ склеивания)

Source: author's results

Источник: собственные результаты авторов

From figure 9 it can be seen that the maximum strength for uneven separation is observed after a technological exposure of 24 hours and is in the range of 0.4 ... 0.5 kN/m. The lower strength range is of load group D1, and lies within 0.2 ... 0.32 kN/m. An analysis of the diagrams shows that the adhesive bond strength for uneven separation of the combined KF-Zh + PVA adhesive (hot method) is close to the strength of the KF-Zh adhesive (hot method). It should be noted that the samples of load groups D2 fell apart before the test.

Comparison of the bonding strength of various adhesive formulations is represented in figures 10-12. After technological exposure (in our case, it was 24 h), the adhesive bond strength for uneven separation for Tytan adhesive is significantly higher than for other adhesives and is 3.143 kN/m at an adhesive consumption of 300 g/m² (figure 10 a). The strength of other types of adhesives is much lower and is in the zone of less than 1kN/m (figure 10 b). It should also be noted that cold

bonding adhesives show a greater strength than hot bonding adhesives.

For the load group D1, the adhesive bond strength for uneven separation for Tytan adhesive is superior to other types of adhesives and is in the range of 3.0 ... 3.5 kN/m at adhesive consumption of 200 and 300 g/m² (figure 11 a). As in the previous case, other types of adhesives showed a lower strength for uneven separation and are in the zone of less than 1kN/m (figure 11 b).

As shown in figure 12, for the load group D2, the adhesive bond strength for uneven separation turned out to be the highest for the combined adhesive KF-Zh + PVA (cold) and is 0.515 kN/m at an adhesive consumption of 210 g/m²; for Tytan adhesive – 0.4 kN/m at an adhesive consumption of 200 and 300 g/m². It should also be noted that the combined adhesive KF-Zh + PVA (hot) did not pass the test and all the samples were destroyed without showing strength values.

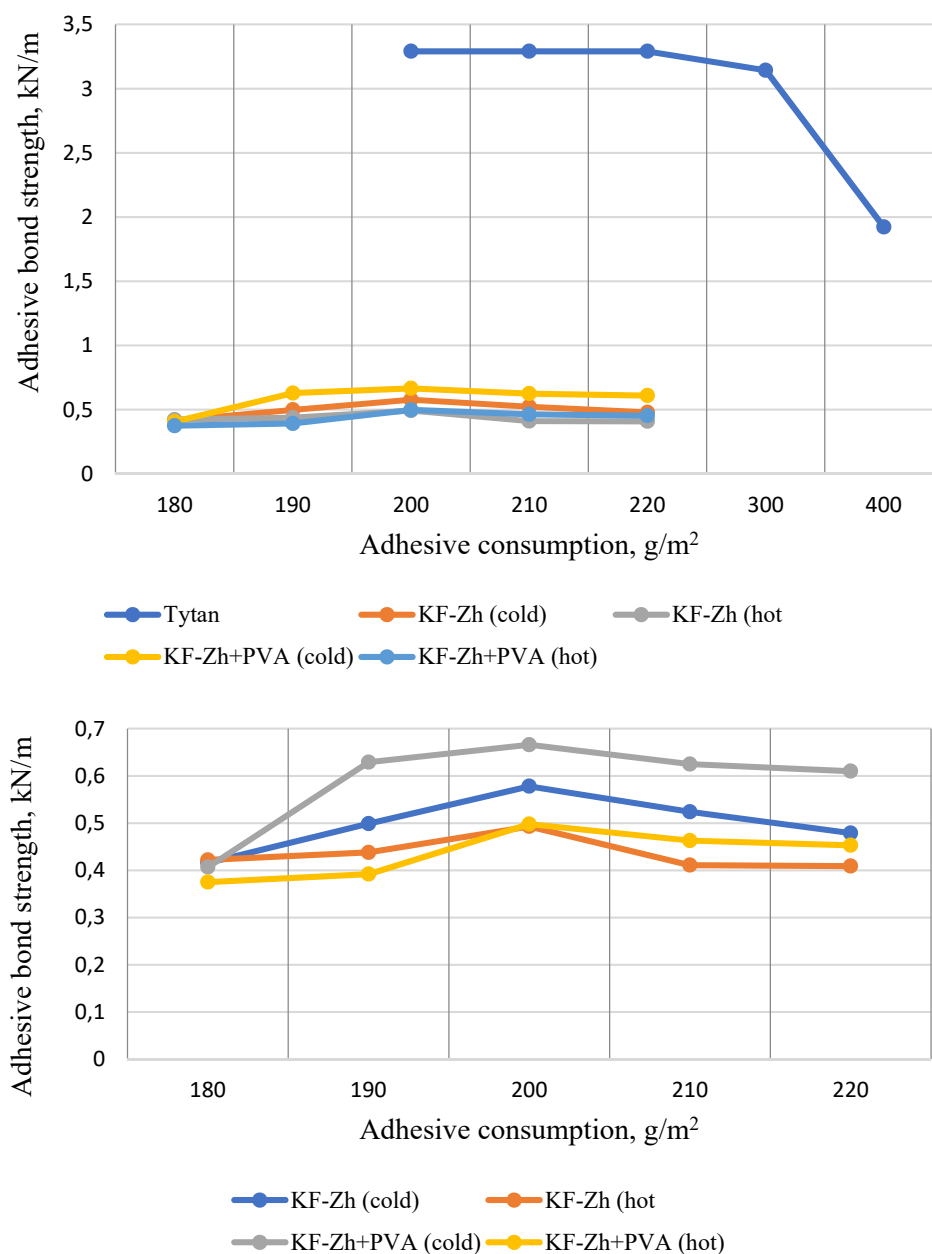


Figure 10. Dependence of the adhesive bond strength for uneven separation on the adhesive consumption (after technological exposure): a – all the investigated adhesives; b – planned adhesives

Рисунок 10. Зависимость прочности клеевого соединения от расхода клея (после технологической выдержки): а – все исследуемые клеи; б – планируемые клеи

Source: author's results

Источник: собственные результаты авторов

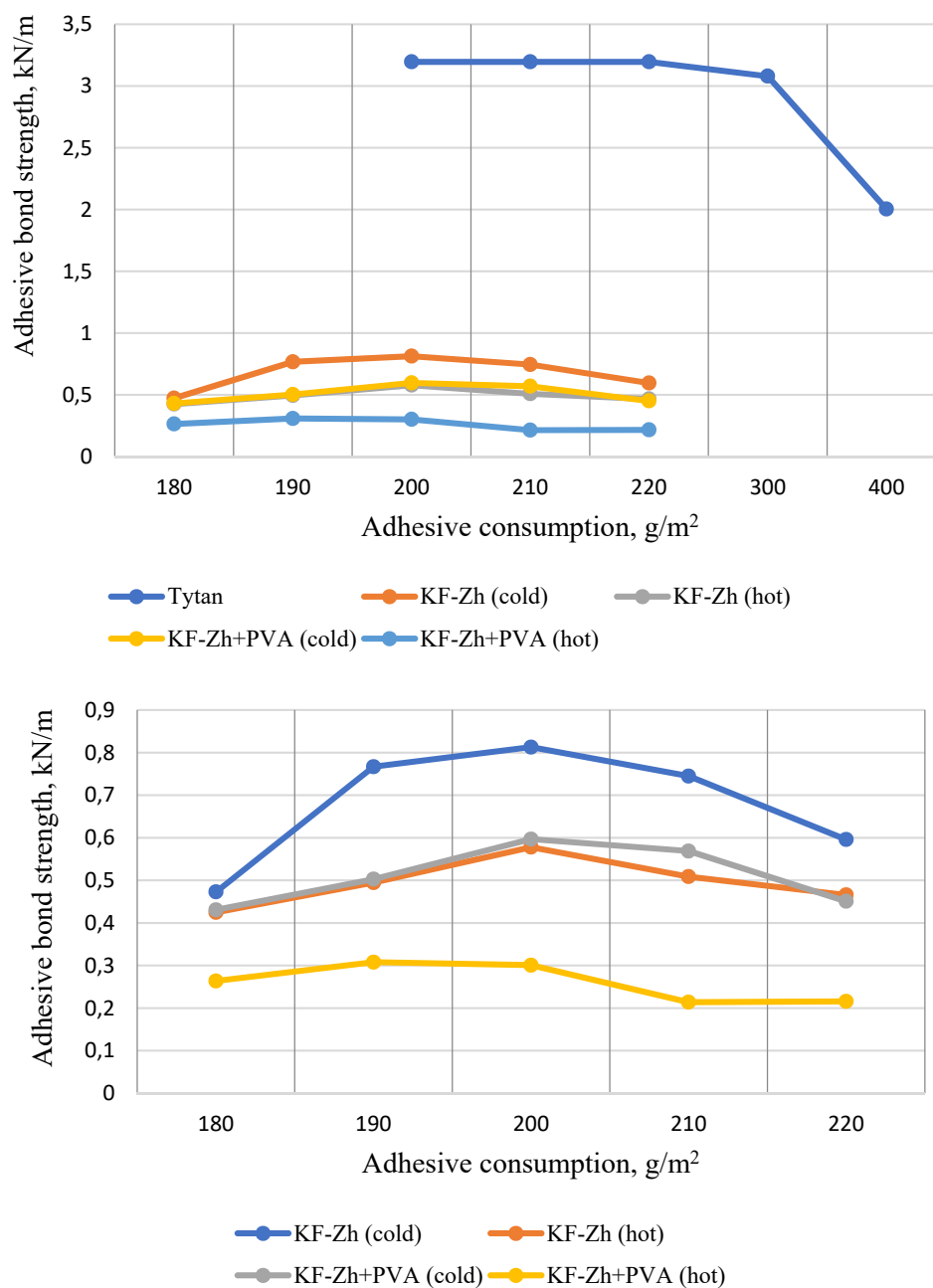


Figure 11. Dependence of the adhesive bond strength on the adhesive consumption (load group D1): a – all the investigated adhesives; b – planned adhesives

Рисунок 11. Зависимость прочности клеевого соединения от расхода клея (по группе нагрузок D1): а – все исследуемые клеи; б – планируемые клеи

Source: author's results

Источник: собственные результаты авторов

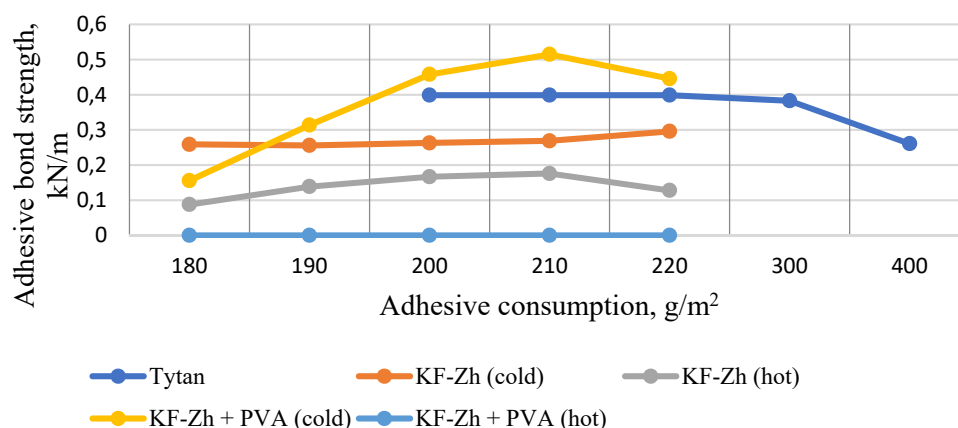


Figure 12. Dependence of the adhesive bond strength on the adhesive consumption (load groups D2)

Рисунок 12. Зависимость прочности клеевого соединения от расхода клея (по группе нагрузок D2)

Source: author's results

Источник: собственные результаты авторов

When gluing in a cold way using urea-formaldehyde and polyvinyl acetate adhesives, the adhesive bond strength is higher than when gluing in a hot way. Adhesives based on urea-formaldehyde resins and polyvinyl acetate have low viscosity. This does not allow to increase the consumption of glue, which is required by the insufficiently flat reverse surface of the flexible stone veneer. Therefore, the adhesive bond strength is low.

Discussion

The use of standard technologies and equipment for facing furniture boards with flexible stone veneer is not advisable, since flexible stone veneer has a significant thickness variation, which complicates pressing in flat presses. Therefore, it is possible to use flexible stone veneer when facing furniture boards only in the manufacture of individual orders manually.

Working with stone veneers has its specific features compared with other materials. It is rare in the natural world to find slates that have similar texture and colour. Therefore, every stone veneer is unique and unrepeatable. Designers will have to carefully approach the selection of colour and texture in a product and in the interiors. Stone veneer has a significant thickness variation and microcracks. It has to do with the characteristics of slates and marbles along with the manufacturing technology. Therefore, after cutting in order to obtain smooth joints, it is necessary to soften the edges by manual grinding. In order to prevent the surface from moisture absorption, it is recommended to treat it with special protective compounds. During the operation it is advisable to lay the stone sheets on a flat horizontal surface, with the stone surface facing upwards. In addition,

before the facing procedure it is necessary to leave it in a heated area for at least 3 days. The curing can be carried out both in cold presses and without them, depending on the brand of adhesive. When using presses, it is necessary to set the specific pressing pressure in order to prevent the glue from squeezing out along the edges. During the facing procedure it is recommended to heat the stone veneer with a building dryer.

Conclusions

1. The use of standard technologies and equipment when lining furniture panels with stone veneer is impractical, since stone veneer has a significant thickness variation, which complicates pressing in flat presses.
2. Adhesives based on urea-formaldehyde resins and polyvinyl acetate have a low viscosity in order to carry out adhesive bonding without pressing.
3. Tytan adhesive showed good bonding strength for uneven separation and retains it both after technological exposure and according to the loading scheme D1 (the adhesive bond strength is 3.25 kN/m), according to the loading scheme D2 the strength is significantly reduced and is within 0.4 kN/m. It should be noted that at an adhesive consumption of 400 g/m² or more, the strength characteristics decrease.
4. When cold method bonding with urea-formaldehyde and polyvinyl acetate adhesives, the bonding strength is higher than when hot bonding.
5. Stone veneer can be used as a facing material in an individual design of modern furniture, while contact assembly adhesives can be used to obtain a high-quality adhesive bond.

References

1. Shengbo Ge, Nyuk Ling, Shuaicheng Jiang, Yong Sik Ok, Su Shiung Lam, Cheng Li, Sheldon Q Shi, Xu Nie, Ying Qiu, Dongli Li, Qing-Ding Wu, Daniel C W Tsang, Wanxi Peng, Christian Sonne. Processed Bamboo as a Novel Formaldehyde-Free High-Performance Furniture Biocomposite. *ACS applied materials & interfaces*, Volume: 12, Issue: 27, Pages: 30824-30832. Jun 26, (2020). <https://doi.org/10.1021/acsami.0c07448>
2. Yi Ren, Yang Yang, Jijuan Zhang, Shengbo Ge, Haoran Ye, Yang Shi, Changlei Xia, Yequan Sheng, Zhongfeng Zhang. Innovative Conversion of Pretreated *Buxus sinica* into High-Performance Biocomposites for Potential Use as Furniture Material. *ACS applied materials & interfaces*, Volume: 14, Issue: 41, Pages: 47176-47187. Oct 10, (2022). <https://doi.org/10.1021/acsami.2c15649>
3. Shujuan Wang, Zhang Tao, Xiaolin Zhang, Shengbo Ge, Wei Fan. Development of 3D needled composite from denim waste and polypropylene fibers for structural applications. *Construction and Building Materials*, Volume: 314, Pages: 125583. (2022). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125583>
4. Natalia Yu Kazakova, Qi Qiu. Material characteristics of traditional chinese furniture. *Scientific and analytical journal Burganov House. The space of culture*, Volume: 19, Issue: 1, Pages: 53-56. Feb 10, (2023). <https://doi.org/10.36340/2071-6818-2023-19-1-53-56>
5. Patent No. 2676345 C2 Russian Federation, IPC E04F 15/02. Multilayer moisture-resistant finishing panel (options) : No. 2016140462 : application 13.09.2013 : publ. 28.12.2018 / P. V. Dusha, F. Erramuspe ; applicant JueS Flos, Inc. Access mode: <https://www.elibrary.ru/srevzb>.
6. Patent No. 2765443 C1 Russian Federation, IPC B44F 9/04. Decorative coating imitating natural stone and the method of its production : No. 2020133755 : application 14.10.2020 : publ. 31.01.2022 / M. V. Suchkov. Access mode: <https://www.elibrary.ru/JQICZR>.
7. Patent No. 2772253 C1 Russian Federation, IPC B44C 5/04. Panel with stone veneer : No. 2020140371 : application 08.06.2018 : publ. 05/18/2022 / D. Dering ; applicant XILO TECHNOLOGIES AG. Access mode: <https://www.elibrary.ru/NHLVIB>.
8. Ponomarenko, L. Stone veneer in furniture and interior design / L. Ponomarenko, E. Kantieva, A. Kireeva // *Modern machines, equipment and solutions of the timber industry complex: theory and practice. Materials of the All-Russian scientific and practical conference. Voronezh, 2021*. pp. 284-291. Access mode: <https://www.elibrary.ru/aiefrb>.
9. *Springer Handbook of Wood Science and Technology* : Springer Handbooks / P. Niemz, A. Teischinger, D. Sandberg eds. – Cham : Springer International Publishing, 2023. 2069 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-81315-4>.
10. Arnaud Morlier, Bianca Lim, Susanne Blankemeyer, Henning Schulte-Huxel, Robert Witteck, Thomas Daschinger, Sonja Bräunig, Marc Köntges, Rolf Brendel. Photovoltaic Modules with the Look and Feel of a Stone Façade for Building Integration. *Solar RRL*, Volume: 6, Issue: 5, Pages: 2100356. Jul 27, (2021). <https://doi.org/10.1002/solr.202100356>.
11. Matej Jošt, Vladislav Kaputa, Martina Nosál'ová, Andreja Pirc Barčič, Ivana Perić, Leon Oblak. Changes in Customer Preferences for Furniture in Slovenia // *Drvna industrija*. 2020; 71 (2): 49–156. <https://doi.org/10.5552/drwind.2020.1967>
12. Lyndon Buck, Sua Lee. Sustainable design approaches using waste furniture materials for design students // *Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering and Product Design Education (2020)*. <https://doi.org/10.35199/epde.2020.38>
13. Mosayebi M., Sadeghi G., Jamjah R. Synthesis of waterborne polyurethane nanocomposite adhesives of bio-based polyol from rapeseed cake residual and cellulose nanowhisker // *Journal of Applied Polymer Science*. 2022; 139 (15): 51954. <https://doi.org/10.1002/app.51954>
14. Radabutra S, Khemthong P, Saengsuwan S, Ponyut, N and Pijarn, N. Preparation and characterization of wood-to-wood bonding adhesive by glycidyl methacrylate grafting natural rubber. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Volume: 114 Pages:103093. (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103093>.

15. Ponomarenko, L.; Kantieva, E.; Posluhaev, M.; Chernyshev, A. A full-scale study of the strength of massive wood gluing with modern adhesives when operating in various conditions. *For. Eng. J.* 2020; 10 (1): 105–115. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.1/11>.

16. Dorieh A, Farajollah Pour M, GhafariMovahed, S, Shahavi M and Aghaei R A review of recent progress in melamine-formaldehyde resin based nanocomposites as coating materials. *Progress in Organic Coatings*, Volume: 165, Pages:106768. (2022). <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.106768>.

17. Yanmei, W.U. Connection node structure for stone facing of energy-saving building wall surface. 2022. Patent CN 216740506 U.

18. Xianyu, Z.; Mingyan, Z.; Lingchi, W.; Tao H. et al. Installation structure of indoor environment-friendly stone veneer. 2022. Patent CN 215484310 U.

19. Attebery II, H. System for mechanical attachment of stone veneer to structures. 2021. Pat.US 11156001 B2.

20. Bo, Z. Stone veneer waistline reinforcing structure. 2021. Patent CN 212478406 U.

Список литературы

1. Shengbo Ge, Nyuk Ling, Shuaicheng Jiang, Yong Sik Ok, Su Shiung Lam, Cheng Li, Sheldon Q Shi, Xu Nie, Ying Qiu, Dongli Li, Qing-Ding Wu, Daniel C W Tsang, Wanxi Peng, Christian Sonne Processed Bamboo as a Novel Formaldehyde-Free High-Performance Furniture Biocomposite. *ACS applied materials & interfaces*, Volume: 12, Issue: 27, Pages: 30824-30832. Jun 26, (2020). <https://doi.org/10.1021/acsami.0c07448>

2. Yi Ren, Yang Yang, Jijuan Zhang, Shengbo Ge, Haoran Ye, Yang Shi, Changlei Xia, Yequan Sheng, Zhongfeng Zhang Innovative Conversion of Pretreated *Buxus sinica* into High-Performance Biocomposites for Potential Use as Furniture Material. *ACS applied materials & interfaces*, Volume: 14, Issue: 41, Pages: 47176-47187. Oct 10, (2022). <https://doi.org/10.1021/acsami.2c15649>

3. Shujuan Wang, Zhang Tao, Xiaolin Zhang, Shengbo Ge, Wei Fan Development of 3D needled composite from denim waste and polypropylene fibers for structural applications. *Construction and Building Materials*, Volume: 314, Pages: 125583. (2022). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125583>

4. Natalia Yu Kazakova, Qi Qiu Material characteristics of traditional chinese furniture. *Scientific and analytical journal Burganov House. The space of culture*, Volume: 19, Issue: 1, Pages: 53-56. Feb 10, (2023). <https://doi.org/10.36340/2071-6818-2023-19-1-53-56>

5. Патент № 2676345 С2 Российская Федерация, МПК E04F 15/02. Многослойная влагостойкая отделочная панель (варианты) : № 2016140462 : заявл. 13.09.2013 : опубл. 28.12.2018 / П. В. Доше, Ф. Эррамуспе ; заявитель ЮуэС Флос, Инк. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/srevzb>.

6 Патент № 2765443 С1 Российская Федерация, МПК B44F 9/04. Декоративное покрытие, имитирующее природный камень, и способ его получения : № 2020133755 : заявл. 14.10.2020 : опубл. 31.01.2022 / М. В. Сучков. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/JQICZR>.

7. Патент № 2772253 С1 Российская Федерация, МПК B44C 5/04. Панель с каменным шпоном : № 2020140371 : заявл. 08.06.2018 : опубл. 18.05.2022 / Д. Деринг ; заявитель КСИЛО ТЕКНОЛОДЖИЗ АГ. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/NHLVIB>.

8. Пономаренко, Л. В. Каменный шпон в дизайне мебели и интерьера / Л. В. Пономаренко, Е. В. Кантеева, А. С. Киреева // *Современные машины, оборудование и IT-решения лесопромышленного комплекса: теория и практика*. – Воронеж: ВГЛТУ, 2021. – С. 284-291. – DOI: https://doi.org/10.34220/MMEITSIC2021_284-291. <https://www.elibrary.ru/aiefrb>

9. *Springer Handbook of Wood Science and Technology* : Springer Handbooks / P. Niemz, A. Teischinger, D. Sandberg eds. – Cham : Springer International Publishing, 2023. 2069 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-81315-4>.

10. Arnaud Morlier, Bianca Lim, Susanne Blankemeyer, Henning Schulte-Huxel, Robert Witteck, Thomas Daschinger, Sonja Bräunig, Marc Köntges, Rolf Brendel Photovoltaic Modules with the Look and Feel of a Stone Façade for Building Integration. *Solar RRL*, Volume: 6, Issue: 5, Pages: 2100356. Jul 27, (2021). <https://doi.org/10.1002/solr.202100356>

11. MatejJošt, Vladislav Kaputa, Martina Nosáľová, Andreja Pirc Barčič, Ivana Perić, Leon Oblak Changes in Customer Preferences for Furniture in Slovenia. *Drvna industrija*, Volume: 71, Issue: 2, Pages: 49-156. Jun 10, (2020). <https://doi.org/10.5552/drvid.2020.1967>
12. Lyndon Buck, Sua Lee Sustainable design approaches using waste furniture materials for design students. *Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering and Product Design Education*, (2020). <https://doi.org/10.35199/epde.2020.38>
13. Mosayebi M., Sadeghi G, Jamjah R Synthesis of waterborne polyurethane nanocomposite adhesives of bio-based polyol from rapeseed cake residual and cellulose nanowhisker. *Journal of Applied Polymer Science*, Volume: 139, Issue: 15, Pages: 51954. (2022). <https://doi.org/10.1002/app.51954>
14. Radabutra S, Khemthong P, Saengsuwan S, Ponyut, N and Pijarn, N. Preparation and characterization of wood-to-wood bonding adhesive by glycidyl methacrylate grafting natural rubber. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Volume: 114, Pages: 103093. (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103093>
15. Натурное исследование прочности склеивания массивной древесины современными клеями при эксплуатации в различных условиях / Л. В. Пономаренко, Е. В. Кантиева, М. А. Послухаев, А. Н. Чернышев // *Лесотехнический журнал*. – 2020. – Т. 10, № 1(37). – С. 105-115. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.1/11>. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/FZPPTK>.
16. Dorieh A, Farajollah Pour M, Ghafari Movahed, S, (...), Shahavi M and Aghaei R A review of recent progress in melamine-formaldehyde resin based nanocomposites as coating materials. *Progress in Organic Coatings*, Volume: 165, Pages: 106768. (2022). <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.106768>
17. Yanmei, W.U. Connection node structure for stone facing of energy-saving building wall surface. 2022. Patent CN 216740506 U.
18. Xianyu, Z.; Mingyan, Z.; Lingchi, W.; Tao H. et al. Installation structure of indoor environment-friendly stone veneer. 2022. Patent CN 215484310 U.
19. Attebery II, H. System for mechanical attachment of stone veneer to structures. 2021. Pat.US 11156001 B2.
20. Bo, Z. Stone veneer waistline reinforcing structure. 2021. Patent CN 212478406 U.

Information about the authors

Larisa V. Ponomarenko – Candidate of Technical Sciences, associate professor of department of mechanical technology of wood, Voronezh State University of Forestry and Technologies name after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8352-1941>, ponomarenko.lara@mail.ru

✉ *Ekaterina V. Kantieva* – Candidate of Technical Sciences, associate professor of department of mechanical technology of wood, Voronezh State University of Forestry and Technologies name after G. F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8352-1941>, ekantieva@mail.ru

Anastasiya S. Kireeva – Master's degree student, Piazzale Aldo Moro 5 00185 – Roma, RM, Italia

Сведения об авторах

Пономаренко Лариса Викторовна – кандидат технических наук, доцент кафедры механической технологии древесины ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1353-2033>, ponomarenko.lara@mail.ru

✉ *Кантиева Екатерина Валентиновна* – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой механической технологии древесины ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8352-1941>, ekantieva@mail.ru

Киреева Анастасия Сергеевна – студент магистратуры, Сапиенца Университет Рима, площадь Альдо Моро, 5, Рим, Италия, 00185

✉ – Для контактов/Corresponding author

Научный обзор

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/10>

УДК 630 : 691.11



Технология изготовления клееных деревянных конструкций с применением древесины, поврежденной огневым воздействием лесного пожара

Владислав А. Мартынов¹, martinov3369@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-6570-0265>

Михаил С. Лисятников¹, mlisyatnikov@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-5262-6609>

Анастасия В. Лукина¹, pismo.33@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0001-6065-678X>

Светлана И. Рощина¹, rsi3@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-0356-1383>

¹ Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Институт архитектуры, строительства и энергетики, ул. Горького, 87, г. Владимир, 600000, Россия

Бережное отношение к природным ресурсам – одно из важнейших составляющих устойчивого развития народного хозяйства РФ. Этому способствует использование низкосортной древесины, в том числе и поврежденной воздействием пожара, в качестве конструкционного материала, что позволит сократить расходы на производство клееных деревянных конструкций (КДК) за счет использования более дешевого сырья. На основании систематического анализа источников и собственных эмпирических исследований приводятся особенности новой технология изготовления деревоклееных балок пролетом 6.0 м с применением древесины, поврежденной огневым воздействием лесного пожара. Данное исследование направлено на снижение материалоемкости клееных деревянных конструкций за счет частичного использования низкосортной древесины без снижения несущей способности балок. Установлено, что при замене 36% средних ламелей в сечении на термически поврежденную древесину снижение несущей способности балочной конструкции относительно балки, изготовленной целиком из древесины I сорта, составило 9.7%, при замене 62% древесины – 16.06%. Применение термически поврежденной древесины при изготовлении клееных деревянных конструкций позволит значительно сократить использование высокосортного пиломатериала при некоторых изменениях технологического процесса, не приводящих к его удорожанию. Используя положительный опыт испытания балочных КДК, предполагается дальнейшее исследование применения термически поврежденной древесины в сжато-изгибаемых конструкциях.

Ключевые слова: *огневое воздействие древесины, деревянные балки, лесные пожары, композитная балка, технология, рациональное использование, клеевые деревянные конструкции (КДК).*

Финансирование: данной исследование не получало внешнего финансирования.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи. Исследования проводились с использованием оборудования межрегионального многопрофильного и междисциплинарного центра коллективного пользования перспективных и конкурентоспособных технологий по направлениям развития и применения в промышленности/машиностроении отечественных достижений в области нанотехнологий (соглашение №075-15-2021-692 от 5 августа 2021 года).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Технология изготовления клееных деревянных конструкций с применением древесины, поврежденной огневым воздействием лесного пожара / В. А. Мартынов, М. С. Лисятников, А. В. Лукина, С. И. Рощина // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 4 (52). – Ч. 1. – С. 158–177. – Библиогр.: с. 170–176 (40 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/10>.

Поступила 16.08.2023 Пересмотрена 27.11.2023. Принята 28.11.2023. Опубликовано онлайн 29.12.2023

Review

Manufacturing technology of glued wooden structures with the use of wood damaged by the fire impact of a forest fire

Vladislav A. Martinov¹, martinov3369@gmail.com  <https://orcid.org/0000-0002-6570-0265>

Mikhail S. Lisyatnikov¹, mlisyatnikov@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-5262-6609>

Anastasiya V. Lukina¹, pismo.33@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0001-6065-678X>

Svetlana I. Roshchina¹  rsi3@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-0356-1383>

¹Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Institute of Architecture Construction and Energy Engineering, st. Gorky, 87, Vladimir, 600000, Russian Federation

Abstract

Caring for natural resources is one of the most important components of the sustainable development of the national economy of the Russian Federation. This is facilitated by the use of low-grade wood, including fire-damaged wood, as a structural material, which will reduce the cost of producing laminated wood structures (GWB) through the use of cheaper raw materials. Based on a systematic analysis of sources and our own empirical research, the features of a new technology for manufacturing laminated wood beams with a span of 6.0 m using wood damaged by fire from a forest fire are presented. This study is aimed at reducing the material intensity of laminated timber structures through the partial use of low-grade wood without reducing the load-bearing capacity of the beams. It was found that when replacing 36% of the middle lamellas in the cross-section with thermally damaged wood, the reduction in the load-bearing capacity of the beam structure relative to a beam made entirely of grade I wood was 9.7%, and when replacing 62% of the wood – 16.06%. The use of thermally damaged wood in the manufacture of laminated wood structures will significantly reduce the use of high-grade lumber with some changes in the technological process that do not lead to an increase in its cost. Using the positive experience of testing beam FDCs, it is planned to further study the use of thermally damaged wood in compression-bending structures.

Keywords: *fire impact of wood, wooden beams, forest fires, composite beam, technology, rational use, adhesive wooden structures.*

Funding: this research received no external funding.

Acknowledgments: authors thank the reviewers for their contribution to the peer review. The research was carried out using the equipment of the interregional multidisciplinary and interdisciplinary center for the collective use of promising and competitive technologies in the areas of development and application in industry/mechanical engineering of domestic achievements in the field of nanotechnology (agreement No. 075-15-2021-692 of August 5, 2021).

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

For citation: Martinov V.A., Lisyatnikov M.S., Lukina A.V., Roshchina S.I. (2023). Manufacturing technology of glued wooden structures with the use of wood damaged by the fire impact of a forest fire. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 4 (52), part 1. pp. 158-177 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/10>.

Received 16.08.2023. *Revised* 27.11.2023. *Accepted* 28.11.2023. *Published online* 29.12.2023.

Введение

Древесина – ценнейший материал, обладающий множеством полезных физико-механических и эксплуатационных свойств, позволяющих использовать его в различных областях, таких как деревообрабатывающая промышленность, строительство, транспорт и энергетика. В целях экономии природных ресурсов следует максимально эффективно использовать древесину, в т.ч. в качестве конструкционного материала. Одним из ключевых аспектов исследований лесов является определение технического качества древесины, поврежденной термическим воздействием лесного пожара, и способах ее дальнейшего применения [6, 18, 30].

При прохождении низового пожара повреждения деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) носят весьма различный характер - от фатального, до совершенно незначительного. Жизнеспособность тех деревьев, у которых порыжела, посерела или тем более осыпалась основная часть хвои, не вызывает сомнения. Такие деревья относятся лесопатологами к категории отмирающих или даже свежего сухостоя (вполне правомерно) и подлежат удалению из насаждения по нормам санитарной безопасности (Правила санитарной безопасности в лесах РФ / Утверждены Правительством Российской Федерации 29 июня 2007 г. № 414. – 2007. – 6 с). А вот жизнеспособность тех деревьев, у которых произошел ожог корневой шейки, закопчен ствол, но крона осталась целой и внешне не отличается от деревьев, не затронутых огнем, объективно диагностировать по внешним признакам крайне сложно. Как известно, поврежденное пожаром дерево теряет иммунитет, становясь более уязвимым к воздействию короедов и нашествию паразитов. Увеличивающаяся продолжительность и интенсивность последних сезонов лесных пожаров ежегодно вызывают массовое поражение миллионов деревьев, способствуя последующей вспышке различных видов подкорковых насекомых, заражающих деревья, не затронутые пожаром [5-6, 21-22].

В предыдущих исследованиях авторами статьи [2-4] было установлено, что частично обугленная древесина сохраняет достаточно высокие физико-механические свойства, что дает возможность использовать ее как конструкционный материал. На прочность древесины в значительной степени оказывает влияние состояние камбия. Степень его повреждения

можно оценить визуально: внешним признаком омертвления камбия является его побурение. Камбий весьма чувствителен к повышению температуры: в различных литературных источниках приведены значения в 54-57 °С как критичные для состояния камбия и жизни дерева в целом [5, 7-10].

Материалы и методы

Объект и предмет исследования

Объектом является новая технология изготовления деревоклееных балок пролетом 6.0 м с учетом требований к клееным деревянным конструкциям (КДК), регламентированным ГОСТ 20850 «Конструкции деревянные клееные несущие. Общие технические условия». Согласно данному нормативному документу, балки пролетом до 7,5 м относятся к классам функционального назначения 2а и 2б, что позволяет использовать при их изготовлении древесину 3-го сорта, к которому, по результатам ранее выполненных испытаний [19, 24], можно отнести древесину, поврежденную огнем воздействием до 15 % от площади поперечного сечения ствола [19, 24].

Предметом исследования является снижение материалоемкости КДК за счет частичного использования низкосортной древесины без снижения несущей способности балок [6,11].

Сбор данных

Для комплексного изучения прочностных и физических характеристик древесины *P. sylvestris*, поврежденной термическим воздействием лесного пожара, были отобраны образцы деревьев из трех лесных хозяйств Якутии. Тип пожара: низовой, среднего масштаба. Отбор образцов произведен в течение двух лет, прошедших после пожара. Повреждение древостоя огнем воздействием составляло 10-15% по поперечному сечению.

Образцы были отобраны из комлевой (на высоте 1,3 м), срединной, а также верхушечной частей ствола дерева. Стандартные образцы для испытаний были изготовлены из каждого среза на разной глубине: в центре, на глубине 0.5 радиуса (в середине) и на периферии (около коры).

В качестве эталона были взяты образцы неповрежденной древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.).

Наряду с этим авторами статьи выполнен широкий комплекс исследований физико-механических

и прочностных свойств древесины, поврежденной огнем воздействием лесного пожара, и анализ механических свойств древесины путем сравнения ее характеристик с эталонными образцами, т.е. не подвергавшимся воздействию пожара. Для этого проведены экспериментальные исследования [12-15] стандартных образцов термически поврежденной древесины и древесины I сорта на сжатие вдоль волокон, скалывание вдоль волокон, поперечный изгиб и растяжение в соответствии с ГОСТ 16483.10-73, ГОСТ 16483.5-73*, ГОСТ 16483.3-84, ГОСТ 16483.23-73 (рис. 1), микроскопический анализ термически поврежденной древесины, а также испытания клеевого соединения на стойкость к температурно-влажностным воздействиям [12-15]. Для проведения исследований древесины были отобраны несколько деревьев (по среднему диаметру), подвергшихся воздействию низового пожара. Выбор данного типа пожара представляет определенный научный и практический интерес в плане дальнейшего использования древесины. Из каждого дерева были вырезаны срезы по высоте ствола. Из каждого среза образцы изготавливали по радиусу: в центре, на 0,5 радиуса (середина) и на периферии [7].



Рисунок 1. Испытание образцов термически поврежденной древесины: а) на сжатие вдоль волокон, б) на скалывание вдоль волокон, в) на поперечный изгиб, г) на растяжение

Figure 1. Testing samples of thermally damaged wood: a) for compression along the fibers, б) for shearing along the fibers, в) for transverse bending, д) for tension

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Для оценки адгезионных свойств было исследовано качество клеевого шва в образцах поврежденной пожаром древесины, при испытании циклическими температурно-влажностными воздействиями. Во время испытания использовался тот же клей, что и для производства самих КДК. Склеивание ламелей производится клеевой системой отдельного нанесения клея и отвердителя ММФ 1255/7555 AkzoNobel Cascomin на основе меламин. Данная ММФ система (меламин, мочевины, формальдегид) является одной из самых широко используемых как в России, так и в Европе. Данная клеевая система отличается очень коротким временем прессования (от 35 минут), высокой экологичностью и безопасностью, хорошей адгезией и проникающей способностью, высокой водо- и атмосферостойкостью, что позволяет применять ее для конструкций, работающих при отрицательных температурах. Следует также отметить, что данная клеевая система обладает конкурентной стоимостью. [25-26]. Испытания клеевого соединения проводились в соответствии с ГОСТ 33121 при помощи климатической камеры КТХВ-1000. Образцы древесины последовательно подвергались замачиванию, замораживанию, оттаиванию и сушке. Механические испытания на скалывание в клеевых соединениях образцов были проведены после 40 циклов температурно-влажностных воздействий. Установлено, что разрушение всех образцов произошло не по клеевому шву, а по волокнам материала. Следовательно, можно сделать вывод о достаточной адгезии термически поврежденной древесины, а также высоком качестве и прочности клеевого соединения (рис. 2).

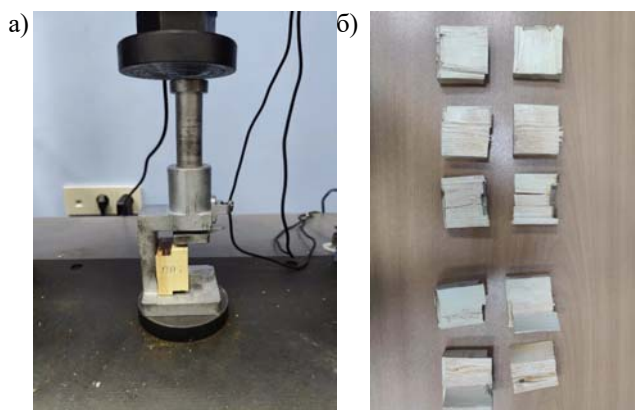


Рисунок 2 – Процесс испытания клеевого соединения:

а) общий вид процесса испытания, б) характер разрушения

Figure 2 - The process of testing the adhesive connection:

a) a general view of the test process, b) the nature of the destruct

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Анализ данных

По результатам испытаний была проведена статистическая обработка данных. Отбор образцов из генеральной совокупности производили в одну стадию с использованием систематического отбора [2]. Минимальное количество испытываемых образцов (n_{\min}) определяли по формуле:

$$n_{\min} = \frac{V^2 \cdot t_{\gamma}^2}{P_{\gamma}^2} \quad (1)$$

где V - коэффициент вариации свойства древесины, %;

γ - требуемая доверительная вероятность;

t_{γ} - квантиль распределения Стюдента;

P_{γ} - относительная точность определения выборочного среднего с доверительной вероятностью.

Относительную точность определения выборочного среднего принимали 5 % при доверительной вероятности 0,95. На случай частичной замены или порчи образцов, количество образцов было увеличено на 20 % относительно расчетного количества в каждом виде испытании.

Результаты и обсуждение

Блок-схема новой технологии изготовления КДК из термически поврежденной древесины

В общем виде технологию изготовления клееных деревянных конструкций с применением древесины, поврежденной огнем, можно

представить в виде принципиальной блок-схемы, представленной на рис. 3:



Рисунок 3. Принципиальная блок-схема изготовления КДК:

1 – отбор деревьев, поврежденных пожаром, пригодных для изготовления КДК; 2 - визуальный контроль и распил древесины, поврежденной огнем воздействием; 3 - приемка входящего обрезного пиломатериала; 4 - контроль качества и формирование сушильных пакетов; 5 - буферный склад хранения пиломатериалов; 6 - сушка пиломатериала в конвективных сушильных камерах; 7 - транспортировка сухого материала в цех переработки; 8 - черновая калибровка пиломатериала, вскрытие дефектов; 9 - маркировка и вырезка недопустимых дефектов; 10 - торцевое сращивание; 11 - буфер хранения сращенной заготовки для адгезии клея; 12 - чистовая калибровка сращенной ламели; 13 - клеенанесение; 14 - запрессовка балки в силовом поле; 15 - буфер хранения клееной заготовки; 16 - калибровка клееной балки; 17 - изготовление сборочных соединений; 18 - формирование транспортного пакета и отгрузка.

Figure 3. Schematic flowchart for the manufacture of glued timber structures:

1 - selection of trees damaged by fire, suitable for the manufacture of glued wooden structures; 2 - visual inspection and sawing of fire-damaged wood; 3 - acceptance of incoming edged lumber; 4 - quality control and formation of drying bags; 5 - buffer warehouse for storing lumber; 6 - drying lumber in convective drying chambers; 7 - transportation of dry material to the processing shop; 8 - rough calibration of lumber, opening of defects; 9 - marking and cutting out unacceptable defects; 10 - end splicing; 11 - storage buffer of the spliced workpiece for adhesive adhesion; 12 - final calibration of the spliced lamella; 13 - glue application; 14 - pressing the beam in the force field; 15 - storage buffer for glued blanks; 16 - calibration of the glued beam; 17 - production of assembly joints; 18 - formation of a transport package and shipment.

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Обоснование возможности применения термически поврежденной древесины

В ходе испытаний [12-15] было установлено, что наибольшее снижение прочности по всем видам проведенных испытаний наблюдается в образцах, взятых из верхней части ствола дерева. Так, при статическом изгибе относительно «эталонной» древесины снижение предела прочности составляет более 20%, при сжатии вдоль волокон – до 28.8%, при растяжении – 30.6%, при скалывании вдоль волокон – 22.7%. Минимальное снижение прочности во всех видах испытаний наблюдалось у образцов, отобранных из комлевой части ствола: при статическом изгибе снижение предела прочности составило почти 6.0%, при сжатии вдоль волокон — 15.0%, при растяжении вдоль волокон — 8.4%, при скалывании вдоль волокон – 10.0% [2-4].

По результатам исследований древесины, поврежденной огнем воздействием пожара, установлено, что, несмотря на сниженные прочностные характеристики, она пригодна для использования в качестве конструкционного материала при изготовлении клееных деревянных конструкций [2-4, 6-9].

Отбор сырьевой древесины, поврежденной огнем воздействием

Технологический процесс отбора и распиловки леса, поврежденного огнем воздействием лесного пожара, на пиломатериал для изготовления КДК несколько отличается от классического процесса обработки древесины. Отбор древесины следует осуществлять в течение первых двух лет после пожара. Исследования [2-4, 7-9] показывают, что древесина *P. sylvestris* через 37 месяцев после низового пожара почти полностью сохраняет физико-механические свойства. При этом разрушаются полностью или частично анатомические элементы древесины, в первую очередь смоляные ходы. Смола сильно пропитывает комлеву часть ствола, чем повышает её плотность. Но одновременно создаются благоприятные условия развития грибных окрасок. Такого рода изменения вызывают грибы, получившие название древоокрашивающих. Проникая в древесину, гифы этих грибов распространяются по полостям клеток, разрушая их содержимое. Плотность при этом снижается, но механические свойства практически сохраняются [7-9].

Перед началом распила следует при помощи измерительных приборов оценить степень повреждения ствола по радиальному срезу. Степень обугливания можно также оценить методом пенетрации (протыкания) с помощью любого тонкого заостренного предмета: шила, ножа, штангенциркуля, стальной линейки. Использование этого метода может быть затруднено в зимний период, когда частицы воды замерзают в порах и трещинах древесины.

Глубина обугливания также включает в себя, кроме непосредственно толщины слоя угля, измеряемого пенетрацией, величину потери сечения древесины. Потеря сечения образуется в результате нарушения смежных с обугленной частью древесины слоев, непригодных для использования [16, 28-29]. Поэтому для заготовки пиломатериала не рекомендуется использовать древесину с огневым поражением более 15% поперечного сечения ствола, поскольку после распила выход полезной древесины будет минимален (рис. 4).



Рисунок 4. Процесс отбора древесины, поврежденной огнем воздействием

Figure 4. The process of selecting wood damaged by fire
Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

При наличии на бревне глубоких локальных повреждений в виде подгаров, оголения потемневшего камбия, их следует вскрывать вручную, и, при необходимости, вырезать, при этом остаточная длина хлыста не должна быть менее 3 м.

Распил древесины может производиться как радиальным, так и тангенциальным методом, при этом следует визуально контролировать наличие подгаров и побурения камбия. Изменение цвета камбия

говорит о его отмирании в процессе пожара, рыхлой пористой структуре вследствие быстрого испарения влаги, и, как следствие, низких механических характеристиках [8-9]. Небольшие потемнения древесины допускаются при изготовлении КДК классов функционального назначения 2а и 2б согласно ГОСТ 20850.

Приемка входящего обрезного пиломатериала

Пиломатериалы хвойных пород по качеству древесины и обработки должны соответствовать ГОСТ 8486. Качество пилопродукции так же, как и круглых материалов, зависит от наличия пороков древесины, дефектов и качества обработки. Оценка качества пиломатериалов (размеры пороков и дефектов) производится по худшей пласти и кромке, а брусков и брусьев квадратного сечения — по худшей стороне.

Основными пороками древесины, в значительной степени влияющими на сорт пилопродукции, являются гниль, сучки, трещины, пороки строения древесины, поражения грибами и насекомыми, дефекты обработки, деформации. Пороки нормируются в каждом сорте на 1 м или на всю длину сортимента.

Для классов функционального назначения клееных деревянных конструкций (КДК) 2а и 2б согласно ГОСТ 20850 допускается использование древесины 1, 2 и 3 сорта. При этом возможно наличие некоторых дефектов, но не допускаются инородные включения и любые гнили, за исключением пестрой ситовой ядровой гнили, которая допускается только в 4-м сорте в виде пятен и полос общей площадью не более 10% площади пиломатериала.

На данном этапе пиломатериал естественной влажности поступает на склад исходного сырья, сортируется по качеству и штабелируется в сушильные пакеты, которые затем перемещаются на промежуточное хранение перед камерной сушкой.

Камерная сушка термически поврежденной древесины

Камерная сушка пиломатериалов – это процесс, который позволяет сократить количество влаги в древесине до заданного уровня. Этот процесс является важным этапом производства деревянных изделий, так как влажность древесины влияет на ее прочность и долговечность.

Камерная сушка происходит в специальных камерах, где древесина подвергается воздействию

тепла и воздуха. Процесс начинается с загрузки пиломатериалов в камеру на деревянных «прокладках» одинаковой толщины, которые способствуют качественной, быстрой и равномерной сушке с минимальными потерями на растрескивание досок. Температура внутри камеры пошагово повышается до 60-80 °С, при этом древесина начинает испарять влагу. Равномерность испарения влаги контролируется стационарными влагомерами древесины серии СВД, предназначенными для дистанционного определения влажности пиломатериалов в сушильных камерах с помощью четырех кондуктометрических датчиков. Современные вакуумные сушильные камеры оснащены автоматикой, позволяющей получить качественный сухой пиломатериал в автоматическом режиме. Управление сушкой задается измерениями относительной влажности в древесине.

Процесс сушки обычной сырьевой древесины занимает до 6 суток для достижения древесиной влажности 10-12%. Такое довольно длительное время, занимаемое технологическим процессом, практически полностью исключает появление усадочных трещин. После окончания сушки камера охлаждается, пакеты древесины перемещаются в цех КДК, где они выдерживаются не менее 8 часов в соответствующих условиях (рис. 5).



Рисунок 5. Пакет древесины после сушки

Figure 5. Wood package after drying

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Следует отметить, что время сушки термически поврежденной древесины до требуемой влажности сокращается, поскольку влажность такой древесины значительно ниже в связи с потерей основного

количества влаги в процессе пожара. В данном случае процесс сушки термически поврежденной древесины составил трое суток до влажности 10%. Это приводит к некоторым неудобствам, поскольку сушить пиломатериал, полученный из древесины, поврежденной пожаром, следует отдельно от основного пакета сырьевой древесины. При этом важно контролировать влажность каждой поступившей на производство партии пиломатериала ручным измерителем влажности древесины (влажмером).

Калибровка материала, полученного из термически поврежденной древесины

После процесса выдержки древесина передается на участок черновой обработки, где удаляются дефекты, которые недопустимы для использования в производстве клееных несущих конструкций.

На этом этапе обработки доски сначала проверяются на соответствие параметров влажности и геометрии, подвергаются калибровке на четырехстороннем продольно-строгальном станке «SCM profiset 60» для вскрытия дефектов и придания четкой геометрии для последующей обработки. Дефекты маркируются вручную и вырезаются на автоматическом торцовочном станке (рис. 6).



Рисунок 6. Автоматический торцовочный станок

Figure 6. Automatic crosscut saw

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Далее готовые детали автоматически перемещаются на линию продольного сращивания. Для предотвращения избыточного количества соединений «мини шип», минимальная длина пиломатериалов для склеивания по длине заготовок элементов

должна быть не менее 600 мм для классов функционального назначения 1а, 1б и 2а и не менее 300 мм для классов 2б и 3. На линии сращивания торцы заготовок автоматически профилируются под шиповое соединение, на торцевой профиль наносятся клей и отвердитель, и заготовки поступают в продольный пресс, где сращиваются в бесконечную заготовку. Длина ламелей может достигать 24, 36 или 50 метров, в зависимости от максимальной длины изготавливаемых КДК.



Рисунок 7. Шиповое соединение ламелей

Figure 7. Stud connection of lamellas

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Заготовки ламелей после сращивания укладываются в штабели на поперечном автоматическом транспортере и выдерживаются не менее 4-5 часов для достижения необходимой прочности торцевым шиповым соединением. После сращенные ламели поштучно поступают чистовую скоростную калибровку на четырехстороннем строгальном станке со скоростью острожки 100-120 м/мин. Такая высокая скорость острожки обусловлена установленным на линии после калибровки ламелей клеенаносящего станка для автоматического нанесения клея на пластъ доски.



Рисунок 8. Участок автоматизированного нанесения клея и отвердителя

Figure 8. Automated adhesive and hardener application area

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Особенности запрессовки ламелей и формирования пакета КДК из первосортной и термически поврежденной древесины

После нанесения клея заготовки поштучно поступают на гидравлический пресс и формируются в пакет необходимой высоты. Набор древесины в пакет осуществляется следующим образом: верхние и нижние слои будущей балочной конструкции формируются из ламелей, изготовленных из древесины I сорта, средние – из термически поврежденной древесины. Это объясняется тем, что максимальные растягивающие и сжимающие усилия возникают в крайних слоях поперечного сечения. Поскольку древесина, поврежденная термическим воздействием, имеет сниженные прочностные характеристики, использование ее в крайних ламелях приведет к снижению несущей способности балки, поэтому наиболее эффективно ее использование в средней части балочной конструкции, где не возникает максимальных нормальных напряжений [25, 27].



Рисунок 9. Формирование пакета ламелей перед запрессовкой

Figure 9. Formation of a stack of lamellas before pressing

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Запрессовка пакета ламелей в прессе осуществляется под давлением 170 бар в течение 45-50 минут при определенном температурно-влажностном режиме в цеху: температура воздуха должна составлять 18-20 °С, влажность воздуха – 60%. После склейки «биндера» (заготовки для клееного бруса) идет следующий этап производства – чистовая обработка бруса. Строгание клееного бруса выполнялось на двустороннем станке LEDINEK SUPERLES при скорости строжки 15 м/мин.



Рисунок 10. Запрессовка пакета ламелей гидравлическими домкратами

Figure 10. Pressing the lamella package with hydraulic jacks

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

В случае производства конструктивных КДК криволинейной формы их склеивание производится в силовых полях. Вертикальные опоры силового поля, к которым производится прижим ламелей, заранее выставляются по необходимой геометрии производимой балки. Выставление геометрии производится либо по шаблону, либо по компьютерной модели балки. После укладки пакета ламелей производят его равномерное затягивание струбцинами при помощи специального гидравлического домкрата, тем самым прижимая заготовку к направляющим для придания ей необходимой формы. Затяжка пакета ламелей для формирования одной балки занимает 10-15 минут. После затяжки на первый слой укладывается следующий ряд струбцин и формируется следующий пакет ламелей. Общее количество балок, одновременно прессуемых в одном силовом поле, не должно превышать 6 штук. После застывания клеевого шва силовое поле освобождается от КДК при помощи кран-балки или тельфера, балки поступают на чистовую калибровку и снятие наплывов клея на широкоформатном рейсмусе на специальной поворотной платформе для калибровки криволинейной балки.

После чистовой обработки и ремонта вскрытых при чистовой калибровке дефектов балки отправляются на склад готовой продукции для отправки заказчику.



Рисунок 11. Серия клееных балок, выполненных по приведенной технологии

Figure 11. A series of glued beams made according to the above technology

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

*Несущая способность крупномасштабных моделей балочных конструкций, включающих элементы термически поврежденной древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.)*

Для определения фактической несущей способности балочных конструкций, изготовленных с применением термически поврежденной древесины *P. sylvestris*, а также для подтверждения предлагаемой технологии, авторами статьи были изготовлены три серии однопролетных балок сечением 70x250(h) мм пролетом 3.0 м с различным процентным соотношением термически поврежденной древесины в середине сечения: 38.4%, 64.0% и эталонные балки, изготовленные целиком из древесины I сорта (рис. 12). Такие процентные соотношения термически поврежденной древесины к общей массе древесины в сечении определены как наиболее оптимальные по результатам ранее выполненных численных исследований в ПК «ЛИРА 10.12». В каждой серии было по 3 балки, выполненные со следующими соотношениями термически поврежденной древесины в сечении:

– БК-1 с 62% замещением ламелей в сечении на термически поврежденную древесину. Результаты численных исследований показывают, что применение термически поврежденной древесины позволяет снизить применение древесины I-го сорта сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) более чем в 1.6 раза, при этом снижение несущей способности балки составит всего 13.36%;

– БК-2 с 36% замещением ламелей на термически поврежденную древесину *P. sylvestris*. Было установлено наименьшее снижение несущей способности по сравнению с эталонной на 2.49 %;

– БК-3, выполненная целиком из древесины сосны (*P. sylvestris*) 1-го сорта.

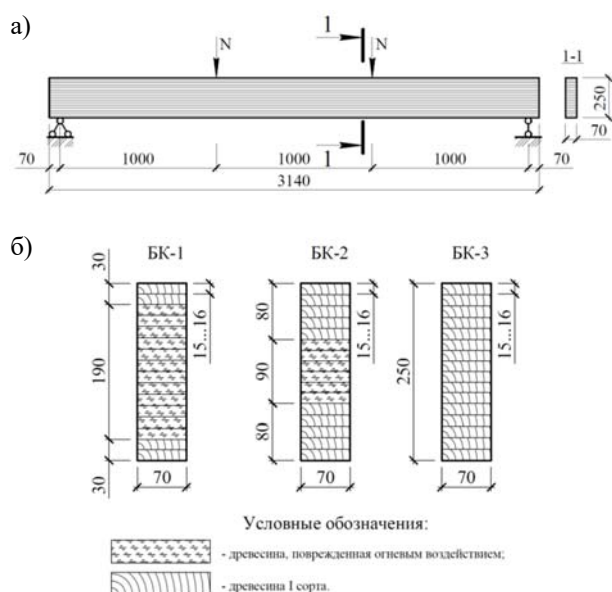


Рисунок 12. Модель исследуемой деревоклееной конструкции:

а) расчетная схема; б) сечения деревоклееной балки со следующими соотношениями термически поврежденной древесины к общей массе: БК-1 – 62%; БК-2 – 36%; БК-3 – «эталонная» балка из древесины I сорта.

Figure 12. Model of the studied laminated wood structure:

а) design diagram; б) cross-sections of a laminated wood beam with the following ratios of thermally damaged wood to the total mass: GB-1 – 62%; GB-2 – 36%; GB-3 – “standard” beam made of grade I wood.

Источник: собственная композиция авторов
Source: author’s composition

Согласно рекомендациям по испытанию деревянных конструкций балки покрытий и перекрытой должны испытываться в условиях шарнирного опирания в опорных точках [17, 23, 27]. Испытание крупномасштабных моделей балочных конструкций выполнено на экспериментальном испытательном стенде, схема которого представлена на рис. 13.

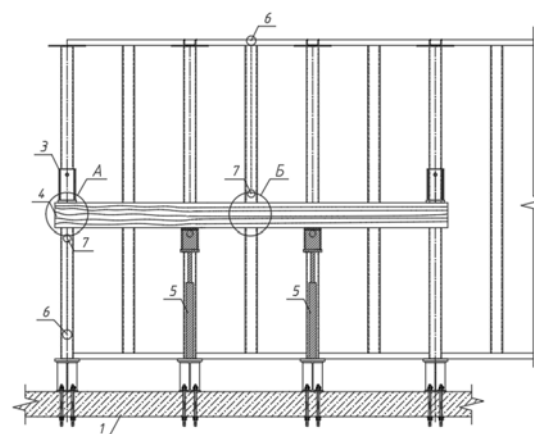


Рисунок 13. Схема испытательного стенда и оборудования: 1 – силовой пол; 2 – рама стенда; 3 – опора балки; 4 – балка; 5 – гидравлический домкрат, соединенный с динамометром; 6 – прогибомер; 6-ПАО; 7 – индикаторы часового типа.

Figure 13. Diagram of the test bench and equipment: 1 – force floor; 2 – stand frame; 3 – beam support; 4 – beam; 5 – hydraulic jack connected to a dynamometer; 6 – deflection meter; 6-PAO; 7 – dial indicators.

Источник: собственная композиция авторов
Source: author’s composition

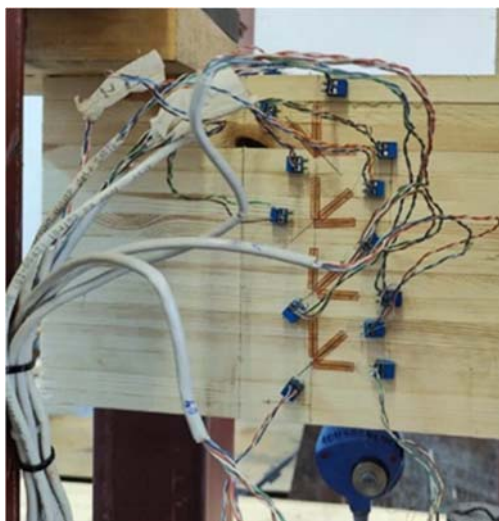
Экспериментальная установка представляет собой каркас из двутавровых балок, к которому прикреплены стальные направляющие в виде труб сечением 120x120 мм. По данным направляющим перемещается траверса с подвижным роликом. За счет подвижного ролика обеспечивается переход нагрузки от домкрата к балке через шарнир. Боковые опоры воспринимают нагрузки от испытываемой балки и представляют собой направляющие из прямоугольных труб с подвижной траверсой, которая фиксируется на необходимой высоте. Источником силовых воздействий являются гидравлические домкраты, объединенные шлангами высокого давления с устройством создания давления – ручным гидравлическим насосом с контрольным манометром [20].

Нагружение балки производили поэтапно с шагом 2,0 кН. Время выдержки после каждого этапа принимали равным 5-10 мин с целью стабилизации деформаций на каждом этапе нагружения.

Для экспериментальных исследований выбран тензометрический метод с использованием измерительного комплекса TDS-530 и тензорезисторов с основанием 20 мм. Тензорезисторы расположены в зоне действия максимального изгибаю-

щего момента по ширине сечения (рис. 14). Вертикальные перемещения и углы поворота устанавливались измерителями отклонения ПАО-6.

а)



б)



Рисунок 14. Размещение тензорезисторов: а) на опоре балки; б) в пролете

Figure 14. Placement of strain gauges: a) on the beam support; b) in the span of the beam

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Фотофиксация испытаний балочных конструкций представлена на рис. 14 и 15. По результатам экспериментальных исследований построены диаграммы зависимости максимальных нормальных напряжений и прогибов от действующей нагрузки (рис. 16 и 17). Разрушение всех балок происходило с разрывом волокон в зоне растягивающих усилий. Этому предшествовало образование пластических шарниров на сжатых волокнах.



Рисунок 15. Разрушение балки БК-1 в зоне растяжения

Figure 15. Failure of beam GB-1 in the tension zone

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Фактическая несущая способность балок БК-1, БК-2 и БК-3 составила 42.53, 45.73 и 50.67 кН/м соответственно. Снижение несущей способности относительно «эталонной» балки БК-3 составила: у БК-1 – 16.06%, БК-2 – 9.7%.

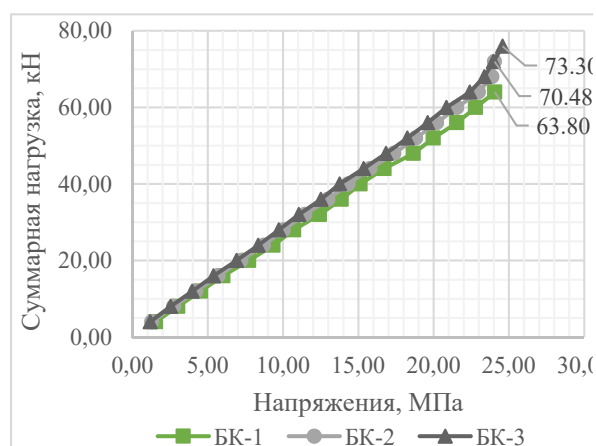


Рисунок 16. Диаграммы зависимости максимальных нормальных напряжений исследуемых балок от действующей нагрузки по результатам экспериментальных данных

Figure 16. Diagrams of the dependence of the maximum normal stresses of the studied beams on the effective load according to the results of experimental data

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

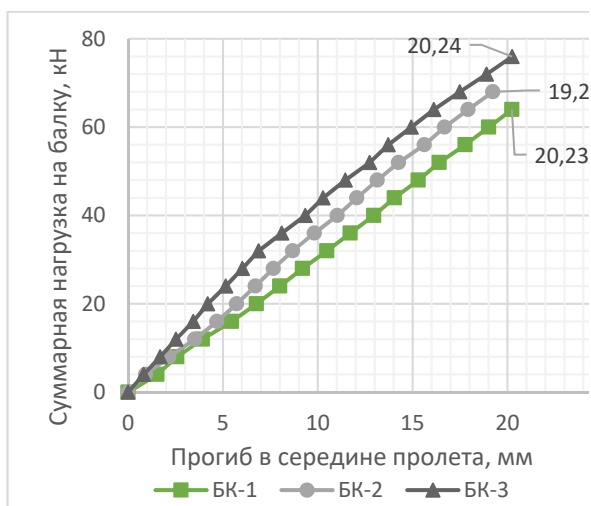


Рис. 17. Диаграммы зависимости прогибов исследуемых балок от действующей нагрузки

Fig. 17. Diagrams of the dependence of the deflections of the studied beams on the effective load based

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Заключение

Приведенная выше технология в значительной степени раскрывает технологические особенности изготовления клееных деревянных балочных конструкций с применением термически поврежденной древесины. Она не требует значительного изменения технологического процесса, для производства используются те же станки, оборудование, клеевой состав, что и для изготовления КДК по классической технологии, следовательно, применение данной технологии не приведет к удорожанию производства.

Список литературы

1. Martinov, V., Lisyatnikov, M., Roshchina, S., Lukina, A. (2024). Physical and Mechanical Properties of Coniferous Wood After Exposure to Fire. In: Vatin, N., Roshchina, S., Serdjuks, D. (eds) Proceedings of MPCPE 2022. MPCPE 2022. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 335. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30570-2_18.
2. Mechanical and microstructural changes in post-fire raw wood / A. Lukina, M. Lisyatnikov, V. Martinov [et al.] // Architecture and Engineering. – 2022. – Vol. 7, No. 3. – P. 44-52. – DOI 10.23968/2500-0055-2022-7-3-44-52. – EDN OHGQVJ. Режим доступа: <https://elibrary.ru/ohgqvj>.
3. Прочностные свойства сырой древесины после лесного пожара / А. Лукина, М. Лисятников, М. Лукин [и др.] // Гражданский журнал. – 2023. – № 3(119). – С. 11907. – DOI 10.34910/MCE.119.7. Режим доступа: <https://elibrary.ru/ЛУННХК>.
4. Прочность и деформативность сырьевой древесины после огневого воздействия / А. В. Лукина, М. С. Лисятников, В. А. Мартынов, С. И. Рощина // Строительство и реконструкция. – 2022. – № 6(104). – С. 40-49. – DOI 10.33979/2073-7416-2022-104-6-40-49. Режим доступа: <https://elibrary.ru/FUHDDN>.

Численность состава рабочих, задействованных на производстве, также остается неизменной. Из вышеперечисленного следует, что применение термически поврежденной древесины при изготовлении клееных деревянных конструкций позволит значительно сократить использование высокосортного пиломатериала при некоторых изменениях технологического процесса, не приводящих к его удорожанию.

Для подтверждения предлагаемой технологии, а также для проведения эксперимента на крупномасштабных моделях, авторами статьи были изготовлены три серии однопролетных балок сечением 70x250(h) мм пролетом 3.0 м с различным процентным соотношением термически поврежденной древесины в середине сечения: 62%, 36% и эталонные балки, изготовленные целиком из древесины I сорта (рис. 11, 12). Такие процентные соотношения термически поврежденной древесины к общей массе древесины в сечении определены как наиболее оптимальные по результатам ранее выполненных численных исследований. Фактическая несущая способность балок БК-1...БК-3 составила 42.53, 45.73 и 50.67 кН/м соответственно. Снижение несущей способности относительно «эталонной» балки БК-5 составила: у БК-1 – 16.06%, БК-2 – 9.7%.

5. Арефьев, С. П. Западносибирская широтно-зональная ксиломикологическая шкала и ее использование для индикации лесорастительных условий / С. П. Арефьев // Сибирский экологический журнал. – 2018. – Т. 25, № 5. – С. 616-633. – DOI 10.15372/SEJ20180509. Режим доступа: <https://elibrary.ru/ycnejf>.
6. Губенко, Л. А. Возможность применения низкосортной древесины в клееных деревянных конструкциях / Л. А. Губенко, М. Г. Хандов // Строительная наука - XXI век : теория, образование, практика, инновации Северо-Арктическому региону : Сборник трудов VII международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения ученых СПбГАСУ (ЛИСИ) В. А. Лебедева, В. А. Трулля, Е. И. Светозаровой, Архангельск, 28–30 июня 2016 года. – Архангельск: ООО "Агентство рекламы РАД", 2016. – С. 64-68. Режим доступа: <https://elibrary.ru/XDQTWV>.
7. Курьянова Т. К., Платонов А. Д., Макаров А. В. Прочность древесины сосны после воздействия пожара (2010 года УОЛ ВГЛТА, Воронеж). Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса. Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию кафедры механической технологии древесины ФГБОУ ВПО КГТУ. Администрация Костромской области, Департамент образования и науки, Международная академия наук о древесине (ИАВС), Региональный координационный совет по современным проблемам лесоведения, ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет леса», ФГБОУ ВПО «Костромской государственный технологический университет». 2012. С. 20-22. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22281919>.
8. Макаров, А. В. Технические качества древесины, поврежденной различными видами пожара / А. В. Макаров // Лесотехнический журнал. – 2011. – № 4(4). – С. 14-18. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17295210>.
9. Макаров А. В. Оценка технического качества древесины сосны, поврежденной пожаром : автореферат дис. ... канд. технических наук : 05.21.05 / Макаров Андрей Васильевич; [Место защиты: Воронеж. гос. лесотехн. акад.]. Воронеж, 2013. 16 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17261786>.
10. Влияние вида пожара на структуру и качество древесины сосны / Т. К. Курьянова, А. Д. Платонов, Н. Е. Косиченко [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2011. – № 74. – С. 291-304. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17261786>.
11. Suzuki, Ji., Mizukami, T., Naruse, T. et al. Fire Resistance of Timber Panel Structures Under Standard Fire Exposure. *Fire Technol* 52, 1015–1034 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10694-016-0578-2>.
12. Roshchina, S., Lukin, M., Lisyatnikov, M. (2020). Compressed-Bent Reinforced Wooden Elements with Long-Term Load. In: Anatolijs, B., Nikolai, V., Vitalii, S. (eds) *Proceedings of ECE 2019. ECE 2019. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 70. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42351-3_7.
13. Sergeev, Michail & Lukin, M & Strekalkin, A & Roshchina, Svetlana. (2021). Mathematical modeling of stress-strain state of the nodal joint of wooden beams. *Journal of Physics: Conference Series*. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/3/032088>.
14. Lisyatnikov, M., Lukina, A., Chibrikin, D., Labudin, B. (2022). The Strength of Wood-Reinforced Polymer Composites in Tension at an Angle to the Fibers. In: Vatin, N., Roshchina, S., Serdjuks, D. (eds) *Proceedings of MPCPE 2021. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 182. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85236-8_46.
15. Griбанov, A. S. Experimental investigations of composite wooden beams with local wood modification / A. S. Griбанov, V. I. Rimshin, S. I. Roshchina // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety, Chelyabinsk, 25–27 сентября 2019 года*. Vol. 687, 3. – Chelyabinsk: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 033039. – DOI 10.1088/1757-899X/687/3/033039. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43233459>.
16. Федотов, И. О. Параметры обугливания древесины с огнезащитой для расчетной методики оценки пределов огнестойкости деревянных конструкций / И. О. Федотов, П. В. Халепа, А. Б. Сивенков // Актуальные проблемы и инновации в обеспечении безопасности : Сборник материалов Дней науки с международным участием, Екатеринбург, 06–10 декабря 2021 года / Уральский институт ГПС МЧС России. Том Часть 1. – Екатеринбург:

Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России, 2022. – С. 262-266. Режим доступа: <https://elibrary.ru/IQGDAG>.

17. Прочность древесины, модифицированной полимерной композицией с наноструктурным наполнителем / М. С. Лисятников, М. В. Лукин, Д. А. Чибрикин, С. И. Рощина // Строительство и реконструкция. – 2022. – № 4(102). – С. 41-51. – DOI 10.33979/2073-7416-2022-102-4-41-51. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49435789>.

18. Найчук, А. Я. Теория и практика дальнейшего развития деревянных конструкций. Часть 1. Нагрузки, расчетные сопротивления и длительная прочность древесины / А. Я. Найчук, А. А. Погорельцев, Е. Н. Серов // Промышленное и гражданское строительство. 2018; 6: 38-44. Режим доступа: <https://elibrary.ru/XRHQGD>.

19. Разработка конструкций из цельной древесины для объектов инфраструктуры / К. П. Пятикрестовский, В. И. Травуш, А. А. Погорельцев, А. А. Клюкин // Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций. 2018; 14 (1): 145-154. DOI: <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2018-14-1-145-154>. Режим доступа: <https://elibrary.ru/EDN YUOFTN>.

20. Roshchina, S., Lukin, M., Lisyatnikov, M., & Koscheev, A. (2018). The phenomenon for the wood creep in the reinforced glued wooden structures. In MATEC Web of Conferences (Vol. 245). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824503020>.

21. Veselkin, D.; Kuyantseva, N.; Pustovalova, L.; Mumber, A. Trends in Forest Fire Occurrence in the Ilmensky Nature Reserve, Southern Urals, Russia, between 1948 and 2014. Forests 2022, 13, 528. <https://doi.org/10.3390/f13040528>.

22. Nemirovsky, Y.V. & Boltaev, Artem. (2017). Calculation and design of hybrid wooden beams. PNRPU Mechanics Bulletin. 129-152. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2017.3.08>.

23. Сопротивление клееной древесины растяжению под различными углами к направлению волокон / Б. В. Лабудин, В. С. Морозов, О. Н. Попов [и др.] // Строительная механика и расчет сооружений. – 2019. – № 3(284). – С. 12-17. Режим доступа: <https://elibrary.ru/MSBNLB>.

24. Berwart, Sebastián & Estrella, Xavier & Montaña, Jairo & Santa Maria, Hernan & Almazán, José & Guindos, Pablo. (2022). A simplified approach to assess the technical prefeasibility of multistory wood-frame buildings in high seismic zones. Engineering Structures. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114035>.

25. Патент № 2587215 С1 Российская Федерация, МПК E04B 1/10, E04B 2/70. Деревянный клееный строительный элемент, способ возведения стеновых конструкций из деревянных клееных строительных элементов : № 2015103127/03 : заявл. 30.01.2015 : опубл. 20.06.2016 / К. В. Иванов. Режим доступа: <https://elibrary.ru/WAWQZZ>.

26. Никитина, А. В. Древесина и клеи, применяемые при изготовлении клееных деревянных конструкций / А. В. Никитина, В. В. Исакова, А. А. Ашихмина // Интеграция наук. – 2018. – № 8(23). – С. 431-433. Режим доступа: <https://elibrary.ru/YWVWOT>.

27. Stress–Strain State of a Wood-Glued Three-Span Beam with Layer-By-Layer Modification / M. Sergeev, A. Lukina, D. Reva, N. Zdravovic // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2022. – Vol. 182. – P. 485-491. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85236-8_43.

28. Zhang, Ying & Sun, Jinhua & Huang, Xinjie & Chen, X.F.. (2013). Heat transfer mechanisms in horizontal flame spread over wood and extruded polystyrene surfaces. International Journal of Heat and Mass Transfer. 61. 28-34. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.01.069>.

29. Bu, Rongwei & Zhou, Yang & Shi, Long & Fan, Chuangang. (2021). Experimental study on combustion and flame spread characteristics in horizontal arrays of discrete fuels. Combustion and Flame. 225. 136-146. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.10.049>.

30. Погорельцев, А. А. Дальнейшее развитие и совершенствование норм проектирования конструкций из древесины / А. А. Погорельцев, К. П. Пятикрестовский // Промышленное и гражданское строительство. – 2019. – № 3. – С. 35-41. – DOI 10.33622/0869-7019.2019.03.35-41. Режим доступа: <https://elibrary.ru/ZAHMEX>.

31. Волынский, В. Н. Взаимосвязь и изменчивость физико-механических свойств древесины / В. Н. Волынский. – 2-е, Исправленное. – Санкт-Петербург : Издательство Лань, 2012. – 224 с. – ISBN 978-5-8114-1308-9. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25483768>.
32. Изменение плотности древесины сосны, поврежденной пожаром при длительном хранении в различных условиях / А. Д. Платонов, Т. К. Курьянова, С. Н. Снегирева, А. В. Макаров // Лесотехнический журнал. – 2014. – Т. 4, № 1(13). – С. 133-135. – DOI 10.12737/3356. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21427585>.
33. Куликов, В. В. Показатели основных физико-механических свойств древесины наиболее твердых древесных пород мира / В. В. Куликов // Наукосфера. – 2023. – № 3-1. – С. 135-142. – DOI 10.5281/zenodo.7714721. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50455065>.
34. Ковтун, И. Ю. Механизм изменения физико-механических свойств древесины при различных температурах и времени термообработки / И. Ю. Ковтун, А. З. Мальцева // Матрица научного познания. – 2021. – № 11-2. – С. 45-50. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47276526>.
35. Корчагов, С. А. Сравнительная характеристика физико-механических свойств древесины сосны в посадках по типам леса / С. А. Корчагов, С. Е. Грибов, Н. А. Клюквина // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. – 2007. – № 5. – С. 54-56. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=10133785>.
36. Распределение влаги по стволу сосны, поврежденной пожаром / Т. К. Курьянова, А. Д. Платонов, С. Н. Снегирева [и др.] // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. – Т. 2, № 2-1(7-1). – С. 275-279. – DOI 10.12737/3017. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21307755>.
37. Polishchuk, E. Yu. Heating and charring of timber constructions with thin-layer fire protection / E. Yu. Polishchuk, A. B. Sivenkov, S. K. Kenzhehan // Magazine of Civil Engineering. – 2018. – No. 5(81). – P. 3-14. – DOI 10.18720/MCE.81.1. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36314110>.
38. Roshchina, S. Compressed-Bent Reinforced Wooden Elements with Long-Term Load / S. Roshchina, M. Lukin, M. Lisvatnikov // Proceedings of ECE 2019 : Energy, Environmental and Construction Engineering, St. Petersburg, Russia, 19–20 ноября 2019 года. – Cham: Springer, 2020. – P. 81-91. – DOI 10.1007/978-3-030-42351-3_7. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43282722>.
39. Strength properties of raw wood after a wildfire / A. Lukina, M. Lisvatnikov, M. Lukin [et al.] // Magazine of Civil Engineering. – 2023. – No. 3(119). – P. 11907. – DOI 10.34910/MCE.119.7. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53806550>.
40. Никитин, А. Н. Влияние высокотемпературной обработки на физико-механические свойства древесины сосны / А. Н. Никитин, М. М. Баяндина, М. А. Баяндин // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки : Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием), Красноярск, 20–21 апреля 2023 года. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2023. – С. 379-381. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54756207>.

References

1. Martinov, V., Lisvatnikov, M., Roshchina, S., Lukina, A. (2024). Physical and Mechanical Properties of Coniferous Wood After Exposure to Fire. In: Vatin, N., Roshchina, S., Serdjuks, D. (eds) Proceedings of MPCPE 2022. MPCPE 2022. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 335. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30570-2_18.
2. Mechanical and microstructural changes in post-fire raw wood / A. Lukina, M. Lisvatnikov, V. Martinov [et al.] // Architecture and Engineering. – 2022. – Vol. 7, No. 3. – P. 44-52. – DOI 10.23968/2500-0055-2022-7-3-44-52. – EDN OHGQVJ. Access mode: <https://elibrary.ru/ohgqvj>.

3. Strength properties of raw wood after a forest fire / A. Lukina, M. Lisyatnikov, M. Lukin [etc.] // *Civil Journal*. – 2023. – No. 3(119). – P. 11907. – DOI 10.34910/MCE.119.7. Access mode: <https://elibrary.ru/JIUHQK>.
4. Strength and deformability of raw wood after fire exposure / A. V. Lukina, M. S. Lisyatnikov, V. A. Martynov, S. I. Roshchina // *Construction and reconstruction*. – 2022. – No. 6(104). – pp. 40-49. – DOI 10.33979/2073-7416-2022-104-6-40-49. Access mode: <https://elibrary.ru/FUHDDN>.
5. Arefiev, S.P. West Siberian latitudinal-zonal xylomycological scale and its use for indicating forest conditions / S.P. Arefiev // *Siberian Ecological Journal*. – 2018. – Т. 25, No. 5. – P. 616-633. – DOI 10.15372/SEJ20180509. Access mode: <https://elibrary.ru/ycnejf>.
6. Gubenko, L. A. Possibility of using low-grade wood in laminated wood structures / L. A. Gubenko, M. G. Khandov // *Construction science - XXI century: theory, education, practice, innovations for the North Arctic region: Collection of works VII international scientific and technical conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of scientists SPbGASU (LISI) V. A. Lebedev, V. A. Trull, E. I. Svetozarova, Arkhangelsk, June 28–30, 2016*. – Arkhangelsk: RAD Advertising Agency LLC, 2016. – pp. 64-68. Access mode: <https://elibrary.ru/XDQTWV>.
7. Kuryanova T.K., Platonov A.D., Makarov A.V. Strength of pine wood after exposure to fire (2010 UOL VGLTA, Voronezh). Current problems and prospects for the development of the timber industry complex. Materials of the international scientific and technical conference dedicated to the 50th anniversary of the Department of Mechanical Wood Technology of the KSTU. Administration of the Kostroma Region, Department of Education and Science, International Academy of Wood Sciences (IAWS), Regional Coordination Council on Contemporary Problems of Wood Science, Moscow State Forest University, Kostroma State Technological University. 2012. pp. 20-22. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22281919>.
8. Makarov, A.V. Technical qualities of wood damaged by various types of fire / A.V. Makarov // *Forestry Journal*. – 2011. – No. 4(4). – pp. 14-18. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17295210>.
9. Makarov A.V. Assessment of the technical quality of pine wood damaged by fire: abstract of thesis. ...cand. technical sciences: 05.21.05 / Makarov Andrey Vasilievich; [Place of protection: Voronezh. state forestry engineering academician]. Voronezh, 2013. 16 p. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17261786>.
10. The influence of the type of fire on the structure and quality of pine wood / T.K. Kuryanova, A.D. Platonov, N.E. Kosichenko [et al.] // *Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University*. – 2011. – No. 74. – P. 291-304. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17261786>.
11. Suzuki, Ji., Mizukami, T., Naruse, T. et al. Fire Resistance of Timber Panel Structures Under Standard Fire Exposure. *Fire Technol* 52, 1015–1034 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10694-016-0578-2>.
12. Roshchina, S., Lukin, M., Lisyatnikov, M. (2020). Compressed-Bent Reinforced Wooden Elements with Long-Term Load. In: Anatolijs, B., Nikolai, V., Vitalii, S. (eds) *Proceedings of EECE 2019*. EECE 2019. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 70. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42351-3_7.
13. Sergeev, Michail & Lukin, M & Strekalkin, A & Roshchina, Svetlana. (2021). Mathematical modeling of stress-strain state of the nodal joint of wooden beams. *Journal of Physics: Conference Series*. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/3/032088>.
14. Lisyatnikov, M., Lukina, A., Chibrikin, D., Labudin, B. (2022). The Strength of Wood-Reinforced Polymer Composites in Tension at an Angle to the Fibers. In: Vatin, N., Roshchina, S., Serdjuks, D. (eds) *Proceedings of MPCPE 2021*. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 182. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85236-8_46.
15. Gribanov, A. S. Experimental investigations of composite wooden beams with local wood modification / A. S. Gribanov, V. I. Rimshin, S. I. Roshchina // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety, Chelyabinsk, 25–27 сентября 2019 года*. Vol. 687, 3. – Chelyabinsk: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 033039. – DOI 10.1088/1757-899X/687/3/033039. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43233459>.
16. Fedotov, I. O. Parameters of charring wood with fire protection for a calculation method for assessing the fire resistance limits of wooden structures / I. O. Fedotov, P. V. Khalepa, A. B. Sivenkov // *Current problems and innovations*

in ensuring safety: Collection materials of Science Days with international participation, Ekaterinburg, December 06–10, 2021 / Ural Institute of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia. Volume Part 1. – Ekaterinburg: Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2022. – P. 262-266. Access mode: <https://elibrary.ru/IQGDAG>.

17. Strength of wood modified with a polymer composition with a nanostructured filler / M. S. Lisyatnikov, M. V. Lukin, D. A. Chibrikin, S. I. Roshchina // Construction and reconstruction. – 2022. – No. 4(102). – P. 41-51. – DOI 10.33979/2073-7416-2022-102-4-41-51. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49435789>.

18. Naichuk, A. Ya. Theory and practice of further development of wooden structures. Part 1. Loads, calculated resistances and long-term strength of wood / A. Ya. Naychuk, A. A. Pogoreltsev, E. N. Serov // Industrial and civil construction. 2018; 6: 38-44. Access mode: <https://elibrary.ru/XRHQGD>.

19. Development of solid wood structures for infrastructure facilities / K. P. Pyatikrestovsky, V. I. Travush, A. A. Pogoreltsev, A. A. Klyukin // International Journal of Calculation of Civil and Construction Structures. 2018; 14 (1): 145-154. DOI: <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2018-14-1-145-154>. Access mode: <https://elibrary.ru/EDN YUOFTN>.

20. Roshchina, S., Lukin, M., Lisyatnikov, M., & Koscheev, A. (2018). The phenomenon for the wood creep in the reinforced glued wooden structures. In MATEC Web of Conferences (Vol. 245). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824503020>.

21. Veselkin, D.; Kuyantseva, N.; Pustovalova, L.; Mumber, A. Trends in Forest Fire Occurrence in the Ilmsky Nature Reserve, Southern Urals, Russia, between 1948 and 2014. Forests 2022, 13, 528. <https://doi.org/10.3390/f13040528>.

22. Nemirovsky, Y.V. & Boltaev, Artem. (2017). Calculation and design of hybrid wooden beams. PNRPU Mechanics Bulletin. 129-152. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2017.3.08>.

23. Resistance of laminated wood to tension at different angles to the direction of the fibers / B.V. Labudin, V.S. Morozov, O.N. Popov [etc.] // Structural mechanics and design of structures. – 2019. – No. 3(284). – pp. 12-17. Access mode: <https://elibrary.ru/MSBNLB>.

24. Berwart, Sebastián & Estrella, Xavier & Montaña, Jairo & Santa Maria, Hernan & Almazán, José & Guindos, Pablo. (2022). A simplified approach to assess the technical prefeasibility of multistory wood-frame buildings in high seismic zones. Engineering Structures. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114035>.

25. Patent No. 2587215 C1 Russian Federation, IPC E04B 1/10, E04B 2/70. Wooden glued building element, method of erecting wall structures from wooden glued building elements: No. 2015103127/03: application. 01/30/2015: publ. 06.20.2016 / K.V. Ivanov. Access mode: <https://elibrary.ru/WAWQZZ>.

26. Nikitina, A.V. Wood and adhesives used in the manufacture of laminated wood structures / A.V. Nikitina, V.V. Isakova, A.A. Ashikhmina // Integration of Sciences. – 2018. – No. 8(23). – pp. 431-433. Access mode: <https://elibrary.ru/YWVWOT>.

27. Stress–Strain State of a Wood-Glued Three-Span Beam with Layer-By-Layer Modification / M. Sergeev, A. Lukina, D. Reva, N. Zdravovic // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2022. – Vol. 182. – P. 485-491. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85236-8_43.

28. Zhang, Ying & Sun, Jinhua & Huang, Xinjie & Chen, X.F.. (2013). Heat transfer mechanisms in horizontal flame spread over wood and extruded polystyrene surfaces. International Journal of Heat and Mass Transfer. 61. 28-34. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.01.069>.

29. Bu, Rongwei & Zhou, Yang & Shi, Long & Fan, Chuangang. (2021). Experimental study on combustion and flame spread characteristics in horizontal arrays of discrete fuels. Combustion and Flame. 225. 136-146. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.10.049>.

30. Pogoreltsev, A. A. Further development and improvement of design standards for wood structures / A. A. Pogoreltsev, K. P. Pyatikrestovsky // Industrial and civil construction. – 2019. – No. 3. – P. 35-41. – DOI 10.33622/0869-7019.2019.03.35-41. Access mode: <https://elibrary.ru/ZAHMEX>.

31. Volynsky, V. N. Interrelation and variability of physical and mechanical properties of wood / V. N. Volynsky. – 2nd, Corrected. – St. Petersburg: Lan Publishing House, 2012. – 224 p. – ISBN 978-5-8114-1308-9. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25483768>.
32. Change in the density of pine wood damaged by fire during long-term storage in various conditions / A. D. Platonov, T. K. Kuryanova, S. N. Snegireva, A. V. Makarov // *Forestry Journal*. – 2014. – Т. 4, No. 1(13). – pp. 133-135. – DOI 10.12737/3356. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21427585>.
33. Kulikov, V.V. Indicators of the basic physical and mechanical properties of wood of the hardest tree species in the world / V.V. Kulikov // *Scienceosphere*. – 2023. – No. 3-1. – pp. 135-142. – DOI 10.5281/zenodo.7714721. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50455065>.
34. Kovtun, I. Yu. mechanism of changes in the physical and mechanical properties of wood at different temperatures and heat treatment times / I. Yu. Kovtun, A. Z. Maltseva // *Matrix of scientific knowledge*. – 2021. – No. 11-2. – P. 45-50. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47276526>.
35. Korchagov, S. A. Comparative characteristics of the physical and mechanical properties of pine wood in plantings by forest type / S. A. Korchagov, S. E. Gribov, N. A. Klyukvina // *Bulletin of the Moscow State Forest University - Forest Bulletin*. – 2007. – No. 5. – P. 54-56. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=10133785>.
36. Distribution of moisture along the trunk of a pine tree damaged by fire / T.K. Kuryanova, A.D. Platonov, S.N. Snegireva [etc.] // *Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*. – 2014. – Т. 2, No. 2-1(7-1). – pp. 275-279. – DOI 10.12737/3017. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21307755>.
37. Polishchuk, E. Yu. Heating and charring of timber constructions with thin-layer fire protection / E. Yu. Polishchuk, A. B. Sivenkov, S. K. Kenzhehan // *Magazine of Civil Engineering*. – 2018. – No. 5(81). – P. 3-14. – DOI 10.18720/MCE.81.1. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36314110>.
38. Roshchina, S. Compressed-Bent Reinforced Wooden Elements with Long-Term Load / S. Roshchina, M. Lukin, M. Lisvatnikov // *Proceedings of ECECE 2019: Energy, Environmental and Construction Engineering*, St. Petersburg, Russia, November 19–20, 2019. – Cham: Springer, 2020. – P. 81-91. – DOI 10.1007/978-3-030-42351-3_7. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43282722>.
39. Strength properties of raw wood after a wildfire / A. Lukina, M. Lisvatnikov, M. Lukin [et al.] // *Magazine of Civil Engineering*. – 2023. – No. 3(119). – P. 11907. – DOI 10.34910/MCE.119.7. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53806550>.
40. Nikitin, A. N. The influence of high-temperature treatment on the physical and mechanical properties of pine wood / A. N. Nikitin, M. M. Bayandina, M. A. Bayandin // *Young scientists in solving current problems of science: Collection of materials of the All-Russian scientific -practical conference of students, graduate students and young scientists (with international participation), Krasnoyarsk, April 20–21, 2023*. – Krasnoyarsk: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev”, 2023. – P. 379-381. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54756207>.

Сведения об авторах

Мартынов Владислав Алексеевич – ассистент кафедры строительных конструкций, Институт архитектуры, строительства и энергетики, ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых» (ВлГУ), ул. Горького, 87, г. Владимир, Российская Федерация, 600000, <http://orcid.org/0000-0002-6570-0265>, e-mail: martynov3369@gmail.com.

Лисятников Михаил Сергеевич – к.т.н., доцент, доцент кафедры строительных конструкций, Институт архитектуры, строительства и энергетики, ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых» (ВлГУ), ул. Горького, 87, г. Владимир, Российская Федерация, 600000, <http://orcid.org/0000-0002-5262-6609>, e-mail: mlisvatnikov@mail.ru.

Лукина Анастасия Васильевна – к.т.н., доцент кафедры строительных конструкций, Институт архитектуры, строительства и энергетики, ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г.

Столетовых» (ВлГУ), ул. Горького, 87, г. Владимир, Российская Федерация, 600000, <http://orcid.org/0000-0001-6065-678X>, e-mail: pismo.33@yandex.ru.

✉ Рощина Светлана Ивановна, д.т.н., проф., зав. кафедрой строительных конструкций, Институт архитектуры, строительства и энергетики, ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых» (ВлГУ), ул. Горького, 87, г. Владимир, Российская Федерация, 600000, <http://orcid.org/0000-0003-0356-1383>, e-mail: rsi3@mail.ru.

Information about the authors

Vladislav A. Martinov – assistant of the Department of Civil Engineering, Institute of Architecture, Construction and Energy, Vladimir State University. A.G. and N.G. Stoletovs (VIGU), Gorky street, 87, Vladimir, Russian Federation, 600000, <http://orcid.org/0000-0002-6570-0265>, e-mail: martinov3369@gmail.com.

Mikhail S. Lisyatnikov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Civil Engineering, Institute of Architecture, Construction and Energy, Vladimir State University. A.G. and N.G. Stoletovs (VIGU), Gorky street, 87, Vladimir, 600000, Russian Federation, <http://orcid.org/0000-0002-5262-6609>, e-mail: mlisyatnikov@mail.ru.

Anastasia V. Lukina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Civil Engineering, Institute of Architecture, Construction and Energy, Vladimir State University. A.G. and N.G. Stoletovs (VIGU), Gorky street, 87, Vladimir, 600000, Russian Federation, <http://orcid.org/0000-0001-6065-678X>, e-mail: pismo.33@yandex.ru.

Svetlana I. Roshchina, Doctor of Technical Sciences, Prof., Head. Department of Civil Engineering, Institute of Architecture, Construction and Energy, Vladimir State University. A.G. and N.G. Stoletovs (VIGU), Gorky street, 87, Vladimir, 600000, Russian Federation, <http://orcid.org/0000-0003-0356-1383>, e-mail: rsi3@mail.ru.

✉ – Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/11>

УДК 630 : (678.002 + 674.048)



Водопоглощение и разбухание древесины *Betula pendula* ROTN, модифицированной олигомерами из побочных продуктов производства полибутадиена

Надежда С. Никулина¹, nad.nikulina2013@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0003-2586-7738>

Ольга Р. Дорняк², ordornyak@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-3714-8167>

Александр И. Дмитренко², dmitrenkov2109@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-9296-1762>

Сергей С. Никулин³, nikulin.nikuli@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0002-8141-8008>

Константин В. Жужукин², kinkon18@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0002-7093-3274>

Наталья В. Черная⁴, chornaya@belstu.by <https://orcid.org/0000-0001-7542-7154>

¹ФГБУ ДПО «Воронежский институт повышения квалификации сотрудников ГПС МЧС России», ул. Краснознаменная, 231, Воронеж, 39405, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, Воронеж, 394087, Российская Федерация

³ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», пр. Революции, 19, Воронеж, 394018, Российская Федерация

⁴УО «Белорусский государственный технологический университет», улица Свердлова, 13а, Минск, 220006, Республика Беларусь

В настоящее время повышенным спросом пользуется натуральная древесина и изделия на её основе. Изучена технология пропитки древесины малоценных пород на примере березы повислой (*Betula pendula* ROTN) олигомерным материалом, полученным из отходов производства каучуков. Получали олигомеры с содержанием стирола 10 и 90 %. В первом случае низкомолекулярный сополимер имел молекулярную массу 1100-1300, а во втором – 1700-2000. Пропитку древесины *B. pendula* ROTN проводили в растворе полученного олигомера в толуоле. Для ускорения процесса высыхания защитного покрытия и повышения его прочности в пропиточный состав вводили сиккатива НФ-1 в количестве 4-5 %. Пропитку проводили при температуре 60 и 120 °С с последующей термообработкой при температуре 100 и 160 °С. С использованием теории планирования эксперимента создана регрессионная модель, позволившая описать влияния ряда технологических показателей на повышение водо- и влагостойкости модифицированной древесины. Проверка коэффициентов моделей на значимость проведена с помощью критерия Стьюдента. Регрессионные модели позволяют прогнозировать характеристики водостойкости древесины *B. pendula* ROTN, модифицированной за счет ее пропитки низкомолекулярным сополимером, содержащим стирол при заданных значениях технологических параметров - содержания стирола в пропитываемом составе, значений температуры пропитки и термообработки. Для повышения эффективности процесса пропитки и термообработки нужно придерживаться минимальных значений рассмотренных температурных интервалов, а содержание стирола в применяемом олигомерном продукте должно быть ~90 % мас. Модифицирующая обработка древесины олигомером из побочных продуктов производства полибутадиена позволяет улучшить её водостойкость. Использование предлагаемых пропиточных составов способствует утилизации отходов и побочных продуктов производства полибутадиена.

Ключевые слова: олигомер, древесина, *Betula pendula* ROTN, модификация, регрессионная модель, водопоглощение, разбухание.

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Водопоглощение и разбухание древесины *Betula pendula* ROTH, модифицированной олигомерами из побочных продуктов производства полибутадиена / Н. С. Никулина, О. Р. Дорняк, А. И. Дмитренко, С. С. Никулин, К. В. Жужукин, Н. В. Черная // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 4 (52). – Ч. 1 – С. 178–190. – Библиогр.: с. 187–189 (26 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/11>.


Поступила 13.09.2023. *Пересмотрена* 27.11.2023. *Принята* 28.11.2023. *Опубликована онлайн* 29.12.2023.

Article


Water absorption and swelling of *Betula pendula* ROTH wood modified with oligomers from by-products of polybutadiene production


Nadezhda S. Nikulina¹, nad.nikulina2013@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0003-2586-7738>

Olga R. Dornyak², ordornyak@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-3921-8018>

Alexander I. Dmitrenkov², dmitrenkov2109@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-5222-0756>

Sergey S. Nikulin³, alex-nz@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0001-9134-464X>

Konstantin V. Zhuzhukin², kinkon18@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0002-6923-7212>

Natalya V. Chernaya⁴, chornaya@belstu.by  <https://orcid.org/0000-0001-7542-7154>

¹Voronezh Institute of Advanced Training of Employees GPS EMERCOM of Russia, 231 Krasnoznamennaya Street, Voronezh, 394052, Russia

²Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva str., Voronezh, 394087, Russia

³Voronezh State University of Engineering Technologies, 19 Revolyutsii Ave., Voronezh, 394018, Russia

⁴Belarusian State Technological University, Sverdlova street, Minsk, 13Ak4, Republic of Belarus

Abstract

Currently, natural wood and products based on it are in high demand. The technology of impregnation of low-value wood species on the example of *B. pendula* ROTH with an oligomeric material obtained from rubber production waste has been studied. Oligomers with a styrene content of 10 and 90% were obtained. In the first case, the low molecular weight copolymer had a molecular weight of 1100-1300, and in the second - 1700-2000. Impregnation of *B. pendula* ROTH wood was carried out in a solution of the obtained oligomer in toluene. In order to speed up the drying process of the protective coating and increase its strength, NF-1 siccativ was introduced into the impregnation composition in an amount of 4-5%. The impregnation was carried out at temperatures of 60 and 120 °C, followed by heat treatment at temperatures of 100 and 160 °C. In the work, using the theory of experimental planning, a regression model was created that made it possible to describe the effects of a number of technological indicators on increasing the water and moisture resistance of modified wood. Verification of the coefficients of the models for significance was carried out using the Student's criterion. The obtained regression models make it possible to predict the characteristics of water resistance of birch wood modified due to its impregnation with a low-molecular copolymer containing styrene at specified values of technological parameters - the styrene content in the impregnating composition, the values of the impregnation temperature and heat treatment. It is shown that in order to increase the efficiency of the impregnation and heat treatment process,

it is necessary to adhere to the minimum values of the considered temperature intervals, and the styrene content in the applied oligomeric product should be ~ 90% by weight. Modifying treatment of wood with an oligomer from by-products of polybutadiene production makes it possible to improve its water resistance. The use of the proposed impregnating compounds contributes to the disposal of waste and by-products of polybutadiene production.

Keywords: *oligomer, wood, Betula pendula* ROTH, *modification, regression model, water absorption, swelling.*

Funding: this research received no external funding.

Acknowledgments: The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

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

For citation: Nikulina N. S., Dornyak O. R., Dmitrenkov A. I., Nikulin S. S., Zhuzhukin K. V., Chernaya N. V. (2023). Water absorption and swelling of *Betula pendula* ROTH wood modified with oligomers from by-products of polybutadiene production. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 4 (52), part 1, pp. 178-190 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/11>.

Received 13.09.2023. *Revised* 27.11.2023. *Accepted* 28.11.2023. *Published online* 29.12.2023.

Введение

Российская Федерация является одним из обладателей самых больших территорий, занимаемых лесами с разнообразием деревьев лиственных и хвойных пород. Лесные ресурсы – это благо для всего человечества и окружающей среды. Пожары, вредители и болезни наносят непоправимый ущерб лесному хозяйству. Рациональное лесопользование, бережливое отношение к лесному хозяйству, как к ценному и дорогостоящему источнику природного полимерного материала имеет важное и актуальное значение.

Древесина является важным инженерным материалом и широко используется в зданиях и мостах однако она подвержена абиотическим и биотическим повреждениям во время эксплуатации.

Консерванты для древесины использовались на протяжении тысяч лет для защиты древесины в процессе эксплуатации от таких повреждений, но возникающие при этом проблемы с экологией и здоровьем вызывают все большую озабоченность. Химическая модификация может улучшить свойства древесины и обеспечить эффективность защиты, сравнимую с консервантами. Используемые химикаты не содержат элементов тяжелых металлов и способны вступать в реакцию с полимерами клеточных стенок древесины или конденсироваться в микроструктурах древесины. В результате риск вымы-

вания химикатов невелик, а значит, защита древесины может сохраняться в течение длительного периода эксплуатации. Следовательно, химическая модификация была признана важной альтернативой [6] консервантам в деревозащитной промышленности [10,11]. Химическая модификация древесины включает в себя методы, при которых химические и/или физические методы применяются для постоянного изменения свойств клеточных стенок древесины, обеспечивая тем самым стойкую защиту древесины, находящейся в эксплуатации. Химическая модификация может быть классифицирована как модификация клеточных стенок [10]. Модификация клеточной стенки относится к процессу, в котором компоненты клеточной стенки древесины изменяются в результате реакции с реактивными низкомолекулярными мономерами или олигомерами, или путем нагревания при высоких температурах. Изменение химического состава древесины, т. е. модификация, может быть использована для улучшения характеристик древесины, например, за счет повышения устойчивости к разложению или стабильности размеров [24]. В литературе описан широкий спектр методов модификации древесины с различными изменениями химического состава древесины.

Модифицированная древесина широко используется для изготовления различных изделий [6].

Лабораторные исследования по химической модификации древесины проводятся уже несколько

десятилетий, и многие разработанные методы модификации были успешно применены в промышленном производстве в последнее десятилетие. На современном рынке существует почти сотня коммерческих торговых марок различных модифицированных пород древесины. Методы модификации древесины обычно включают использование высокой температуры, катализаторов, воды/органических растворителей и химически активных или неактивных веществ [26]. Влияние процессов химической модификации на стабильность размеров, сорбцию влаги, стойкость к гнилостным грибкам и атмосферным воздействиям было подробно описано и рассмотрено.

Перспективными и экологичными являются древесно-пластиковые композиты [17], которые являются экологически чистыми материалами и отличаются долговечностью [13]. Материалы, которые производятся путем смешивания биополимеров и натуральных наполнителей, позволяют адаптировать свойства композитов в соответствии с предъявляемыми потребителями требованиями [25]. Одним из примеров материалов на биологической основе являются древесно-пластиковые композиты, которые состоят из древесных частиц, внедренных в нефтехимическую пластиковую матрицу [17].

Термообработка включает в себя несколько методов обработки древесины при высоких температурах (обычно 150-230 °С) в защитной среде, такой как пар, азотный газ, растительные масла или под вакуумом [16,23]. Термическая обработка может привести к потере массы древесины, потемнению внешнего вида. В целом, древесина, обработанная при более высоких температурах в течение более длительного времени, демонстрирует более значительную потерю массы, цвета и механических свойств, но большее улучшение стабильности размеров и биологической долговечности. Термическая обработка приводит к снижению большинства прочностных свойств древесины, которые зависят от температуры и времени обработки [18-20].

Термореактивные смолы, такие как мочевино-формальдегидные, фенол-формальдегидные и меламино-формальдегидные, могут быть использованы для пропитки древесины под вакуумным давлением и вступить в реакцию в структуре древесины

при высокой температуре. Проникновение смол в структуру древесины сильно зависит от молекулярного веса смол, который определяет характер модификации (модификация клеточных стенок и/или заполнение клеточных просветов). Исследование показало, что низкомолекулярные (290-480) ПФ-смолы могут проникать в клеточные стенки, а высокомолекулярные (820) в основном заполняют клеточный просвет. Диффузия низкомолекулярных смол в слои клеточных стенок древесины наблюдалась с помощью спектроскопии потери электронов и УФ-микроскопии. Проникновение водорастворимых смол в древесину происходит относительно легче, если древесина имеет высокое содержание влаги и низкое содержание экстрактивных веществ, а также если концентрация смол низкая [10,12]. Реакция смол в веществах клеточной стенки может стабилизировать древесину по размерам, в то время как заполнение просветов практически не оказывает такого воздействия на древесину [1,9].

Целью исследования является изучение влияния наиболее важных технологических показателей в процессе пропитки древесины модификаторами на основе олигомеров с использованием теории планирования эксперимента.

Материалы и методы

Объект и предмет исследования

Для исследований использовали образцы древесины *Betula pendula* ROTN стандартных размеров (20x20x10 длина, ширина, толщина) с плотностью 635 кг/м³.

Дизайн эксперимента

Для пропитки натуральной древесины применяли олигомерные продукты, синтезированные из отходов производства бутадиеновых каучуков, по методике, используемой в работе [5]. Получали олигомеры с содержанием стирола 10 и 90 %. В первом случае низкомолекулярный сополимер имел молекулярную массу 1100-1300, а во втором- 1700-2000. Пропитку древесины березы повислой (*B. pendula* ROTN) проводили в растворе полученного олигомера в толуоле. Для ускорения процесса высыхания защитного покрытия и повышения его прочности в пропиточный состав вводили сиккатива НФ-1 в количестве 4-5 %.

Интерес к использованию данного олигомера в производстве модифицированной древесины базируется на том, что он не обладает токсичностью и использовался для производства лакокрасочных материалов (Олифа полидиеновая, ТУ 463-1-367.73).

Пропитку древесины березы повислой (*B. pendula* ROTN) проводили погружением образцов в раствор синтезированного олигомера. В первом случае температура пропитки составляла 60°C, а во втором - 120°C. Продолжительность пропитки составляла 8 часов. В последующем проводили дегазацию пропитанных образцов при температуре 90-100°C и их термообработку при температурах 100 и 160°C в течение 5 часов.

Водопоглощение и разбухание модифицированной и необработанной древесины определяли по стандартным методикам, описанным в исследовании [14].

Анализ данных

Для оценки эффективности пропитки древесины синтезированными олигомерами использовали полный факторный эксперимент типа 2ⁿ [24]. Расчет проводился в программе STATISTICA 10 (Software Inc).

К первому фактору (V_1) отнесли содержание стирола в олигомере (10÷90 % мас). Ко второму фактору (V_2) отнесли температуру пропитки (60÷ 120°C). В качестве третьего фактора (V_3) использовали температуру термообработки (100÷160°C).

Влияние этих факторов оценивали по следующим показателям модифицированной древесины: водопоглощение (y' , %), разбухание в тангенциальном направлении (y'' ,%) и разбухание в радиальном направлении (y''' ,%). Образцы обработанной и необработанной древесины выдерживали в воде в течении 30 суток.

Применен план эксперимента с варьированием факторов в двух уровнях – минимальном и максимальном. Верхний и нижний уровни каждого фактора кодированы на отрезок [-1, +1]. Выполнено 8 опытов ($N=2^3$), которые включают все возможные комбинации этих уровней. Для каждого опыта выполнено по 4 повторения ($n=4$).

Для проверки однородности дисперсии функций отклика использован критерий Кохрена, поскольку дублирование опытов было равномерным [7]. Критическое значение критерия Кохрена для 5% уровня значимости $G_{кр}(0.05, N, n-1)=0.4377$.

Далее находили значения дисперсии воспроизводимости $S^2_{y..}$, значения дисперсии адекватности $S^2_{ад.}$ и значения критерия Фишера $F.$, после чего строили поверхность отклика.

Результаты

В табл. 1 приведены значения функций отклика.

Таблица 1

Значения функций отклика

Table 1

Response Function Values

Значения фактора Factor values			1 сутки 1 day			30 сутки 30 day		
V_1	V_2	V_3	y'	y''	y'''	y'	y''	y'''
10	60	100	23,4	7,2	5,0	75,3	11,8	9,0
90	60	100	20,5	6,7	4,4	66,3	9,7	7,4
10	120	100	17,3	4,9	4,1	71,6	10,1	8,3
90	120	100	16,1	5,2	4,2	63,7	8,8	6,9
10	60	160	19,9	6,0	4,6	72,9	10,6	8,5
90	60	160	18,0	5,8	4,4	64,2	9,1	7,2
10	120	160	15,7	4,8	3,6	70,0	9,4	7,8
90	120	160	13,9	4,2	2,9	62,9	8,3	5,6

Источник: собственные данные авторов

Source: authors' own data

Значения критерия Кохрена, рассчитанные для всех опытов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения критерия Кохрена

Table 2

Values of the Cochran test

Сутки day	Критерий Кохрена G Cochran G criterion		
	y'	y''	y'''
1	0,42	0,23	0,23
30	0,31	0,29	0,29

Источник: собственные данные авторов

Source: authors' own data

Из табл. 2 видно, что процесс является воспроизводимым. Следовательно, возможно построение линейных моделей регрессии для опытов по водопоглощению и разбуханию образцов модифицированной древесины.

найлены для всех функций отклика. Они приведены в табл. 3. Кодированные переменные x_i соответствуют факторам V_i ($i=1,2,3$). В табл. 4 представлены значения дисперсии воспроизводимости S^2_y . В табл. 5 представлены значения дисперсии адекватности $S_{2ад.}$. В табл. 6 представлены значения критерия Фишера F.

Коэффициенты уравнений множественной регрессии вида

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 \quad (1)$$

Таблица 3

Коэффициенты уравнений регрессии

Table 3

Coefficients of regression equations

Сутки day	Функция отклика Response function	Коэффициенты уравнений регрессии Coefficients of regression equations			
		a_0	a_1	a_2	a_3
1	y'	18,09	-0,97	-2,35	-1,23
1	y''	5,59	-0,1312	-0,8312	-0,3937
1	y'''	4,134	-0,1719	-0,4344	-0,2719
30	y'	68,39	-4,097	-1,3156	-0,8594
30	y''	9,72	-0,7562	-0,5812	-0,375
30	y'''	7,59	-0,8	-0,4312	-0,3062

Источник: собственные данные авторов

Source: authors' own data

Таблица 4.

Значения дисперсии воспроизводимости

Table 4

Reproducibility dispersion values

Сутки day	Дисперсия воспроизводимости S^2_y Reproducibility dispersion		
	y'	y''	y'''
1	0,74	0,22	0,18
30	1,74	0,29	1,32

Источник: собственные данные авторов

Source: authors' own data

Таблица 5

Значения дисперсии адекватности

Table 5

Adequacy variance values

Сутки day	Дисперсия адекватности $S^2_{ад}$ Adequacy dispersion $S^2_{ад}$		
	y'	y''	y'''
1	1,36	0,36	0,47
30	1,77	0,30	0,44

Источник: собственные данные авторов

Source: authors' own data

Таблица 6.

Значения критерия Фишера

Table 6

Fisher criterion values

Сутки day	Критерий Фишера F Fisher's criterion F		
	y'	y''	y'''
1	1,84	1,62	2,61
30	1,01	1,03	1,38

Источник: собственные данные авторов

Source: authors' own data

Критическое значение критерия Фишера для построенных моделей при 5 % уровне значимости $F_{кр}(0.05, f_{ад}, f_y)=3,43$. Здесь $f_{ад}, f_y$ – число степеней свободы дисперсии адекватности и дисперсии воспроизводимости. При этом $f_{ад}=N-d=4$, где d – число коэффициентов в уравнении регрессии, $f_y=N(n-1)=24$. Из табл. 6 видно, построенные модели

линейной регрессии являются адекватными, для всех серий $F < F_{кр}$.

Проверка коэффициентов моделей на значимость проведена с помощью критерия Стьюдента t . Критерии значимости коэффициентов регрессии приведены в табл. 7.

Таблица 7

Критерии значимости коэффициентов регрессии

Table 7

Criteria for the significance of regression coefficients

Сутки day	Функция отклика Response function	Критерии значимости коэффициентов регрессии t Significance criteria for regression coefficients t			
		a_0	a_1	a_2	a_3
1	y'	87,26	4,67	11,33	5,94
1	y''	52,86	1,24	7,85	3,72
1	y'''	34,00	1,41	3,57	2,24
30	y'	289,90	17,37	5,58	3,64
30	y''	99,61	7,75	5,96	3,84
30	y'''	64,56	6,81	3,67	2,61

Источник: собственные данные авторов

Source: authors' own data

Критическое число Стьюдента для построенных моделей при уровне значимости 10% равно $t_{кр}$ $(0.1, N-d)=2.13$. Из таблицы 7 видно, что по t-критерию влияние первого фактора не значимо для моделей разбухания образцов в 1 сутки для обеих осей анизотропии, определяющих y'' и y''' . Уравнения линейной регрессии записаны после исключения незначимых коэффициентов для натуральных (некодированных) факторов.

Для первых суток наблюдения эти уравнения имеют вид

$$\begin{aligned} y' &= 31,45 - 0,0194 \cdot V_1 - 0,0783 \cdot V_2 - 0,0410 \cdot V_3; \\ y'' &= 9,92 - 0,0277 \cdot V_2 - 0,0131 \cdot V_3; \\ y''' &= 6,79 - 0,0145 \cdot V_2 - 0,0091 \cdot V_3. \end{aligned} \quad (2)$$

На 30 сутки исследуемые свойства композита определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} y' &= 80,16 - 0,0819 \cdot V_1 - 0,0439 \cdot V_2 - 0,0286 \cdot V_3; \\ y'' &= 13,84 - 0,0151 \cdot V_1 - 0,0194 \cdot V_2 - 0,0125 \cdot V_3; \\ y''' &= 11,01 - 0,0160 \cdot V_1 - 0,0144 \cdot V_2 - 0,0102 \cdot V_3. \end{aligned} \quad (3)$$

Иллюстрация зависимостей (2-3) представлена на рис. 1 в виде поверхности отклика.

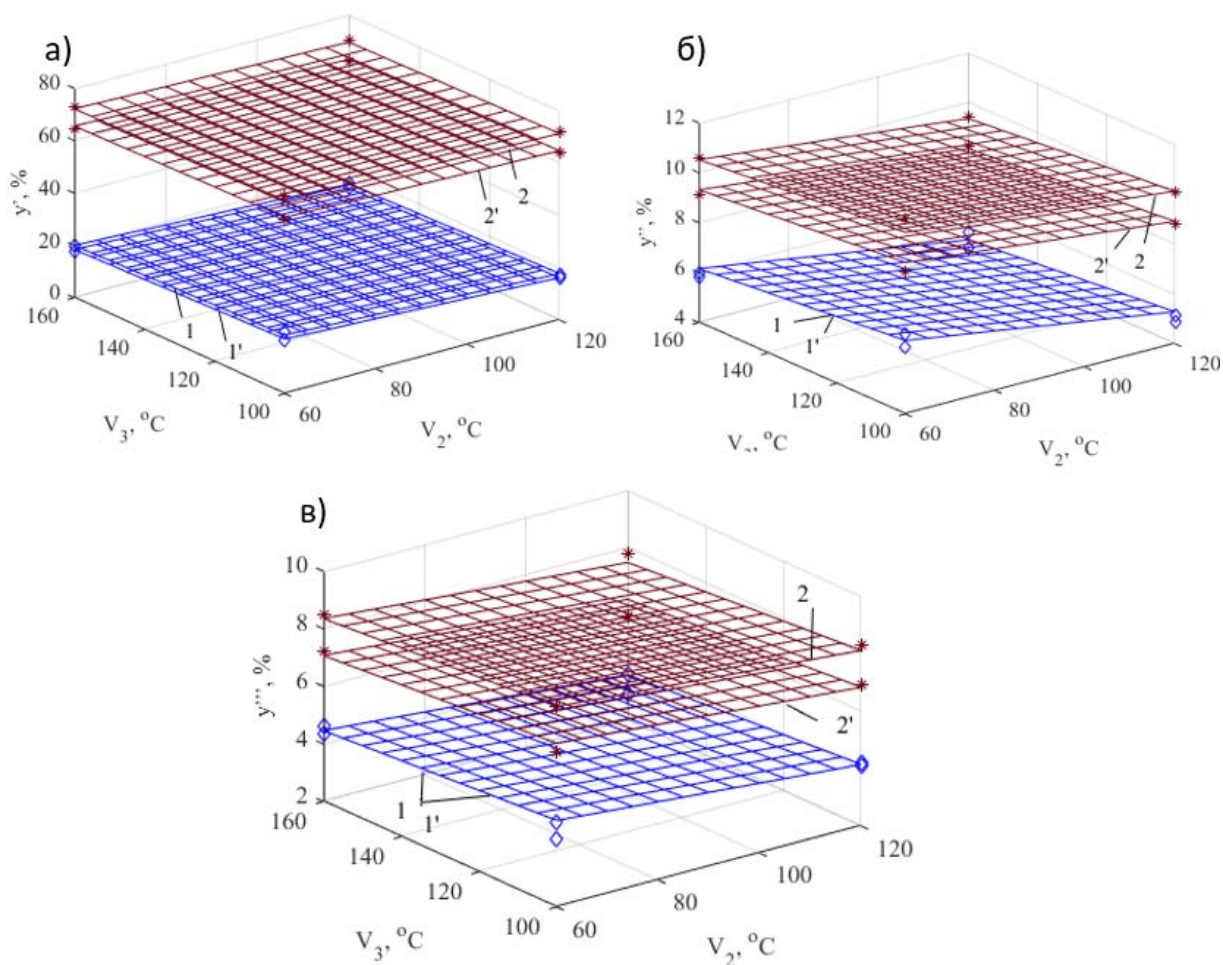


Рисунок 1 – Расчетные зависимости величины водопоглощения (а), разбухания в тангенциальном направлении (б), разбухания в радиальном направлении (в) модифицированной древесины y' , % от температуры пропитки V_2 , °C и температуры термообработки V_3 , °C при различных значениях содержания стирола в олигомере $V_1=10\%$ - 1, 2; 90% - 1', 2' через 1 сутки - 1, 1' и через 30 суток - 2, 2'. Маркеры – экспериментальные значения.

Figure 1 - Calculated dependences of the water absorption value (a), swelling in the tangential direction (b), swelling in the radial direction of the modified wood y' , % on the impregnation temperature V_2 , 0C and the heat treatment temperature V_3 , 0C at different values of the styrene content in the oligomer $V_1 = 10\%$ - 1, 2; 90% - 1', 2' after 1 day - 1, 1' and after 30 days - 2, 2'. Markers - experimental values.

Источник: собственные данные авторов

Source: authors' own data

Обсуждение

Регрессионные модели (2-3) позволяют прогнозировать характеристики водостойкости древесины *B. pendula* Roth, модифицированной за счет ее пропитки низкомолекулярным сополимером, содержащим стирол при заданных значениях технологических параметров - содержания стирола в пропитывающем составе, значений температуры пропитки и термообработки. Очевидно, что с течением времени увеличивается величина всех трех исследуемых показателей. При этом для материала с большим содержанием стирола наблюдаются менее интенсивные показатели водопоглощения и разбухания. Достаточно слабым оказывается влияние на показатели y' , y'' , y''' режимных значений температуры пропитки и термообработки древесины. Таким образом, для повышения энергоэффективности операции пропитки и термообработки нужно придерживаться минимальных значений рассмотренных температурных интервалов, а содержание стирола в применяемом олигомерном продукте должно быть ~90 % мас.

С использованием метода планирования эксперимента установлены оптимальные условия процесса модификации натуральной древесины березы. Полученные результаты имеют важное прикладное значение для реализации данного процесса в промышленных масштабах, что отсутствовало в приведенных выше литературных источниках [1,25]. Разработанная модель позволяет более полно и объек-

тивно описывать предлагаемую технологию обработки древесины в сравнении с существующими способами [10, 16, 23].

Заключение

Разработаны защитные составы для обработки древесины на основе олигомерных продуктов, полученных из отходов производства каучуков.

Выполнено экспериментальное исследование свойств модифицированной древесины, позволившее определить влияние ряда технологических показателей (массового содержания олигомера, значений температуры пропитки и термообработки) на повышение её водо- и влагостойкости.

Установлено, что влияние режимных значений температуры пропитки и термообработки древесины незначительно, а содержание стирола в пропиточном растворе является наиболее существенным фактором, определяющим способность исследуемого древесного материала к водопоглощению и разбуханию. При увеличении содержания стирола в составе пропиточной смеси от 10 до 90 % на 30 сутки наблюдения водопоглощение в образцах модифицированной древесины снижается на 12%, а разбухание в тангенциальном и радиальном направлении - на 18% и 17% соответственно.

Использование предлагаемых пропиточных составов позволит утилизировать отходы и побочные продукты производства полибутадиена.

Список литературы

1. Nikulina N., Vostrikova G., Dmitrenkov A., Nikulin S. Modification of low-molecular copolymer from by-products of butadiene rubber by secondary expanded polystyrene // *ChemChemTech*. 2019; 62 (1): 114-119. DOI: <http://doi.org/10.6060/ivkkt.20196201.5768>.
2. Mills N., Jenkins M., Kukureka S. *Plastics: microstructure and engineering applications*. – Butterworth-Heinemann, 2020. DOI: <http://doi.org/13960/t78t3r22k>.
3. Hagiopol C. Natural polyphenols applications // *Natural polyphenols from wood: tannin and lignin—an industrial perspective*. 2021; 8: 259-314. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822205-8.00004-9>.
4. Li P. et al. Preparation and characterization of sodium silicate impregnated Chinese fir wood with high strength, water resistance, flame retardant and smoke suppression // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2020. – Т. 9. – №. 1. – С. 1043-1053. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.10.035>.
5. Kurkowiak K., Emmerich L., Militz H. Wood chemical modification based on bio-based polycarboxylic acid and polyols—status quo and future perspectives // *Wood Material Science & Engineering*. – 2022. – Т. 17. – №. 6. – С. 1040-1054. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1925961>.
6. Sangregorio A. et al. Humic based resin for wood modification and property improvement // *Green Chemistry*. 2020; 22 (9): 2786-2798. DOI: <http://doi.org/10.1039/C9GC03620B>.
7. Wang J., Zhang D., Chu F. Wood-Derived Functional Polymeric Materials // *Advanced Materials*. – 2021. – Vol. 33 (28), 2001135. DOI: <http://doi.org/10.1002/adma.202001135>
8. Dong Y. et al. Environmentally benign wood modifications: a review // *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2020; 8 (9): 3532-3540. <https://doi.org/10.1021/acsmacrolett.2c00427>.
9. Lykidis C., Kotrotsiou K., Tsihlikis A. Reducing set-recovery of compressively densified poplar wood by impregnation—modification with melamine—formaldehyde resin // *Wood Material Science & Engineering*. 2020; 15 (5): 269-277. <https://doi.org/10.1080/17480272.2019.1594365>.
10. Lin, W., Huang, Y., Li, J. et al. Preparation of highly hydrophobic and anti-fouling wood using poly(methylhydrogen)siloxane // *Cellulose*. 2018. Vol. 25: 7341. <https://doi.org/10.1007/s10570-018-2074-y>.
11. Čermák P. et al. Wood-water interactions of thermally modified, acetylated and melamine formaldehyde resin impregnated beech wood // *Holzforschung*. 2022; 76 (5): 437-450. <https://doi.org/10.1515/hf-2021-0164>.
12. Podkościelna B. et al. Interactions between biofiller-modified polymeric composites and wood-rotting fungi in terms of their biotechnological applications // *Industrial Crops and Products*. 2022; 186: 115125. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115125>.
13. Baar J. et al. Effect of hemp oil impregnation and thermal modification on European beech wood properties // *European Journal of Wood and Wood Products*. 2021; 79 (1): 161-175. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01615-9>.
14. Shen X. et al. Effect of furfurylation on hierarchical porous structure of poplar wood // *Polymers*. 2020; 13 (1): 32. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13010032>.
15. Srikanthan V. et al. Wood-mimicking bio-based biporous polymeric materials with anisotropic tubular macropores // *Polymers*. 2021; 13 (16): 2692. DOI: <http://doi.org/10.3390/polym13162692>.
16. Popescu C. M., Pfriem A. Treatments and modification to improve the reaction to fire of wood and wood based products—An overview // *Fire and Materials*. 2020; 44 (1): 100-111. DOI: <https://doi.org/10.1002/fam.2779>.
17. Holy S., Temiz A., Köse Demirel G., Aslan M., Mohamad Amini M.H. Physical properties, thermal and fungal resistance of Scots pine wood treated with nano-clay and several metal-oxides nanoparticles // *Wood Material Science and Engineering*. 2020; 16 (1): 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480272.2020.1836023>.
18. Candelier K., Atli A., Alteyrac J. Termite and decay resistance of bioplast-spruce green wood-plastic composites // *European Journal of Wood and Wood Products*. 2019; 77: 157-169. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-018-1368-y>.
19. Impregnation of wood with waste engine oil to increase water-and bio-resistance / L. Belchinskaya, K. V. Zhuzhukin, T. Ishchenko, A. Platonov. *Forests*. 2021; 12 (12): 1762. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12121762>.

20. Tomak E. D. Surface wettability of boron and oil-treated wood // *Cerme*. 2022; 28. DOI: <https://doi.org/10.1590/01047760202228013058>.
21. Yang H. et al. Lignin-derived bio-based flame retardants toward high-performance sustainable polymeric materials // *Green Chemistry*. 2020; 22 (7): 2129-2161. DOI: <http://doi.org/10.1039/D0GC00449A>
22. Nguyen T. T., Xiao Z., Che W., Trinh H. M. and Xie Y. Effects of modification with a combination of styrene-acrylic copolymer dispersion and sodium silicate on the mechanical properties of wood // *J. Wood Sci.* 2019; 65: 1. DOI: <https://doi.org/10.1186/s10086-019-1783-7>.
23. Qiu Z., Xiao Z., Gao L., Li J., Wang H., Wang Y., Xie Y. Transparent wood bearing a shielding effect to infrared heat and ultraviolet via incorporation of modified antimony-doped tin oxide nanoparticles // *Composites Science and Technology*. 2019; 172 (1): 43–48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.01.005>.
24. Shishlov O. F., Baulina N. S., Glukhikh V. V., El'tsov O. S., Shafran Yu. M., Buryndin V. G., Stoyanov O. V. Synthesis of cardanol-containing resols for producing phenolic films: protective coatings for wood composites // *Polymer Science. Series D*. 2021; 14: 328–334. DOI: <http://doi.org/10.1134/S1995421221030308>.
25. Разработка модифицирующих составов древесины на основе побочных продуктов производства полибутадиена и метилметакрилата / Н. С. Никулина, А. И. Дмитренко, Е. В. Томина [и др.] // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. – 2023. – № 245. – С. 318-330. – DOI <http://doi.org/10.21266/2079-4304.2023.245.318-330>. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/negrk>.
26. Томина, Е. В. Использование наноразмерного ZnO в составах для защитной обработки древесины / Е. В. Томина, А. И. Дмитренко, К. В. Жужукин // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. – 2022. – № 4(388). – С. 173-184. – DOI: <http://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-4-173-184>. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/fcfeof>.

References

1. Nikulina N. S. et al. Modification of low-molecular copolymer from by-products of butadiene rubber by secondary expanded polystyrene // *NEWS OF HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS. SERIES “CHEMISTRY AND CHEMICAL TECHNOLOGY”*. – 2019. – Vol. 62. – №. 1. – С. 114-119. DOI: <http://doi.org/10.6060/ivkkt.20196201.5768>
2. Mills N., Jenkins M., Kukureka S. *Plastics: microstructure and engineering applications*. – Butterworth-Heinemann, 2020. DOI: <http://doi.org/13960/t78t3r22k>
3. Hagiopol C. Natural polyphenols applications // *Natural Polyphenols from Wood: Tannin and Lignin—An Industrial Perspective*. – 2021. – P. 259. DOI: <http://doi.org/10.3390/ma14247774>
4. Li P. et al. Preparation and characterization of sodium silicate impregnated Chinese fir wood with high strength, water resistance, flame retardant and smoke suppression // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2020. – Т. 9. – №. 1. – С. 1043-1053. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.10.035>.
5. Kurkowiak K., Emmerich L., Militz H. Wood chemical modification based on bio-based polycarboxylic acid and polyols—status quo and future perspectives // *Wood Material Science & Engineering*. – 2022. – Т. 17. – №. 6. – С. 1040-1054. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1925961>.
6. Sangregorio A. et al. Humin based resin for wood modification and property improvement // *Green Chemistry*. – 2020. – Т. 22. – №. 9. – С. 2786-2798. DOI: <http://doi.org/10.1039/C9GC03620B>.
7. Wang J., Zhang D., Chu F. Wood-Derived Functional Polymeric Materials // *Advanced Materials*. – 2021. – Vol. 33 (28), 2001135. DOI: <http://doi.org/10.1002/adma.202001135>
8. Dong Y. et al. Environmentally benign wood modifications: a review // *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. – 2020. – Vol 8 (9). P. 3532-3540. <https://doi.org/10.1021/acsmacrolett.2c00427>.
9. Lykidis C., Kotrotsiou K., Tsihlakis A. Reducing set-recovery of compressively densified poplar wood by impregnation–modification with melamine–formaldehyde resin // *Wood Material Science & Engineering*. – 2020. – Vol. 15 (5). P. 269-277. <https://doi.org/10.1080/17480272.2019.1594365>.

10. Lin, W., Huang, Y., Li, J. et al. Preparation of highly hydrophobic and anti-fouling wood using poly(methylhydrogen)siloxane // *Cellulose*. –2018. Vol. 25: 7341. <https://doi.org/10.1007/s10570-018-2074-y>.
11. Čermák P. et al. Wood-water interactions of thermally modified, acetylated and melamine formaldehyde resin impregnated beech wood // *Holzforschung*. 2022; 76 (5): 437-450. <https://doi.org/10.1515/hf-2021-0164>.
12. Podkościelna B. et al. Interactions between biofiller-modified polymeric composites and wood-rotting fungi in terms of their biotechnological applications // *Industrial Crops and Products*. 2022; 186: 115125. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115125>
13. Baar J. et al. Effect of hemp oil impregnation and thermal modification on European beech wood properties // *European Journal of Wood and Wood Products*. 2021; 79 (1): 161-175. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01615-9>.
14. Shen X. et al. Effect of furfurylation on hierarchical porous structure of poplar wood // *Polymers*. 2020; 13 (1): 32. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13010032>.
15. Srikanthan V. et al. Wood-mimicking bio-based biporous polymeric materials with anisotropic tubular macropores // *Polymers*. 2021; 13 (16): 2692. DOI: <http://doi.org/10.3390/polym13162692>
16. Popescu C. M., Pfriem A. Treatments and modification to improve the reaction to fire of wood and wood based products—An overview // *Fire and Materials*. 2020; 44 (1): 100-111. DOI: <https://doi.org/10.1002/fam.2779>.
17. Holy S., Temiz A., Köse Demirel G., Aslan M., Mohamad Amini M.H. Physical properties, thermal and fungal resistance of Scots pine wood treated with nano-clay and several metal-oxides nanoparticles // *Wood Material Science and Engineering*. 2020; 16 (1): 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480272.2020.1836023>.
18. Candelier K., Atli A., Alteyrac J. Termite and decay resistance of bioplast-spruce green wood-plastic composites // *European Journal of Wood and Wood Products*. 2019; 77: 157-169. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-018-1368-y>.
19. Impregnation of wood with waste engine oil to increase water-and bio-resistance / L. Belchinskaya, K. V. Zhuzhukin, T. Ishchenko, A. Platonov. *Forests*. 2021; 12 (12): 1762. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12121762>.
20. Tomak E. D. Surface wettability of boron and oil-treated wood // *Cerme*. 2022; 28. DOI: <https://doi.org/10.1590/01047760202228013058>.
21. Yang H. et al. Lignin-derived bio-based flame retardants toward high-performance sustainable polymeric materials // *Green Chemistry*. 2020; 22 (7): 2129-2161. DOI: <http://doi.org/10.1039/D0GC00449A>
22. Nguyen T. T, Xiao Z., Che W., Trinh H. M. and Xie Y. Effects of modification with a combination of styrene-acrylic copolymer dispersion and sodium silicate on the mechanical properties of wood // *J. Wood Sci*. 2019; 65: 1. DOI: <https://doi.org/10.1186/s10086-019-1783-7>.
23. Qiu Z., Xiao Z., Gao L., Li J., Wang H., Wang Y., Xie Y. Transparent wood bearing a shielding effect to infrared heat and ultraviolet via incorporation of modified antimony-doped tin oxide nanoparticles // *Composites Science and Technology*. 2019; 172 (1): 43–48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.01.005>.
24. Shishlov O. F., Baulina N. S., Glukhikh V. V., El'tsov O. S., Shafran Yu. M., Buryndin V. G., Stoyanov O. V. Synthesis of cardanol-containing resols for producing phenolic films: protective coatings for wood composites // *Polymer Science. Series D*. 2021; 14: 328–334. DOI: <http://doi.org/10.1134/S1995421221030308>
25. Razrabotka modificiruyushhix sostavov drevesiny' na osnove pobochny'x produktov proizvodstva polibutadiena i metilmetakrilata / N. S. Nikulina, A. I. Dmitrenkov, E. V. Tomina [i dr.] // *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotexnicheskoy akademii*. – 2023. – № 245. – S. 318-330. – DOI 10.21266/2079-4304.2023.245.318-330.
26. Tomina, E. V. Ispol'zovanie nanorazmernogo ZnO v sostavax dlya zashhitnoj obrabotki drevesiny' / E. V. Tomina, A. I. Dmitrenkov, K. V. Zhuzhukin // *Izvestiya vy'sshix uchebny'x zavedenij. Lesnoj zhurnal*. – 2022. – № 4(388). – S. 173-184. – DOI 10.37482/0536-1036-2022-4-173-18

Сведения об авторах

Никулина Надежда Сергеевна – кандидат технических наук, старший преподаватель Воронежского института - филиала ФГБОУ ВО «Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: Nikulin_sergey48@mail.ru.

Дорняк Ольга Роальдовна – заведующий кафедрой электротехники, теплотехники и гидравлики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», доктор технических наук, доцент, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: ordornyak@mail.ru.

Дмитренко Александр Иванович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры химии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: chem@vgtu.ru.

Никулин Сергей Саввович – доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: Nikulin_sergey48@mail.ru

✉ *Жужукин Константин Викторович* – преподаватель кафедры химии, м.н.с. НИИ ИТЛК Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: kinkon18@yandex.ru.

Черная Наталья Викторовна – профессор кафедры химической переработки древесины УО «Белорусский государственный технологический университет», Республика Беларусь, доктор технических наук, профессор. E-mail: chornaya@belstu.by

Information about the authors

Nadezhda S. Nikulina – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Voronezh Institute - Branch of the Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Voronezh, Russian Federation; e-mail: Nikulin_sergey48@mail.ru.

Olga R. Dornyak – Head of the Department of Electrical Engineering, Heat Engineering and Hydraulics, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh, Russian Federation; e-mail: ordornyak@mail.ru.

Alexander I. Dmitrenkov – Ph.D, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russian Federation; e-mail: dmitrenkov2109@mail.ru

Sergey S. Nikulin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Senior Researcher of the All-Russian Scientific Center of the Air Force "Air Force Academy named after prof. NOT. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin", Voronezh, Russian Federation; e-mail: Nikulin_sergey48@mail.ru

✉ *Konstantin V. Zhuzhukin* – Lecturer, Department of Chemistry, Junior Researcher NII ITLC, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russian Federation; e-mail: kinkon18@yandex.ru.

Natalya V. Chernaya – Professor of the Department of Chemical Wood Processing of the Belarusian State Technological University, Republic of Belarus, Doctor of Technical Sciences, Professor. E-mail: chornaya@belstu.by

✉ – Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/12>

УДК 630.43:630.812



Влагопроводность ядровой древесины сосны, поврежденной сильным низовым и беглым верховым пожаром

Алексей Д. Платонов ✉, aleksey66@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0001-5941-6287>

Светлана Н. Снегирева, svetka-sneg@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0003-4371-2270>

Екатерина В. Кантиева, ekantieva@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-8352-1941>

Александра В. Киселева, avk50@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0002-5960-6133>

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

Действие пожара оказывает влияние на ствол дерева. Из общего количества пожаров в лесостепной зоне России преобладают сильные низовые пожары. В результате этого вида пожара выгорает подлесок, что способствует наиболее длительному воздействию высокой температуры на комлевою, хозяйственно ценную, часть ствола. Воздействие высокой температуры оказывает влияние на структуру анатомических элементов древесины, происходит нарушение её целостности. В древесине сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), стоящей на корню, после повреждения пожаром протекают деструктивные процессы, оказывающие существенное влияние на её физико-механические свойства и сопровождаемые интенсивным смолообразованием. Одним из первичных процессов в технологии переработки древесины является её обезвоживание, в результате которой древесина превращается из природного материала в технологическое сырьё. Поэтому применение существующих технологических режимов сушки к древесине, поврежденной пожаром, нецелесообразно. Проведение процессов обезвоживания или увлажнения древесины невозможно без сведений о величине её влагопроводности. Влагопроводность древесины определяется коэффициентом влагопроводности. Величину коэффициента влагопроводности образцов поврежденной пожаром и неповрежденной ядровой древесины *P. sylvestris*, извлеченных из комлевой части ствола, определяли методом стационарного тока влаги в радиальном и тангенциальном направлениях. По сравнению с неповрежденной древесиной сосны обыкновенной у древесины, поврежденной пожаром, наблюдается обратная зависимость интенсивности тока влаги – в тангенциальном направлении выше, чем в радиальном. Происходит общее снижение коэффициента влагопроводности древесины сосны: в радиальном направлении – на 40.2 ± 1.58 % ($p < 0.05$), в тангенциальном – на 14.5 ± 0.92 % ($p < 0.05$) по сравнению с неповрежденной древесиной. Закономерности изменения величины коэффициента влагопроводности в древесине сосны, поврежденной пожаром, позволяют скорректировать существующие режимы сушки и повысить качество высушиваемой древесины и эффективность технологии сушки древесины.

Ключевые слова: коэффициент влагопроводности, влажность древесины, хвойная древесина, *Pinus sylvestris* L., древесина на корню, древесина ядровая, метод стационарного тока влаги, диффузный ток влаги, лесной пожар

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

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


Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Благопроводность ядровой древесины сосны, поврежденной сильным низовым и беглым верховым пожаром / А. Д. Платонов, С. Н. Снегирева, Е. В. Кантиева, А. В. Киселева // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 4 (52). – Ч. 1. – С. 191–208. – Библиогр.: с. 204–208 (31 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/12>.

Поступила 04.12.2023. *Пересмотрена* 14.12.2023. *Принята* 16.12.2023. *Опубликована онлайн* 29.12.2023.

Article

Heartwood moisture conductivity of standing pine damaged by running crown and strong surface wildfire

Aleksey D. Platonov✉, aleksey66@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-5941-6287>

Svetlana N. Snegireva, svetka-sneg@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-4371-2270>

Ekaterina V. Kantieva, ekantieva@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-8352-1941>

Aleksandra V. Kiseleva, avk50@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-5960-6133>

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

Abstract

The forest fire has an effect on the tree trunk. Of the total number of fires in the forest-steppe zone of Russia, strong grass-roots fires prevail. As a result of this type of fire, the undergrowth burns out, which contributes to the most prolonged exposure to high temperature on the lumpy, economically valuable part of the trunk. The effect of high temperature affects the structure of the anatomical elements of wood, its integrity is violated. In the standing timber of the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) destructive processes occur after fire damage, which have a significant effect on its physico-mechanical properties and are accompanied by intensive tar formation. One of the primary processes in wood processing technology is its dehydration, as a result of which wood is transformed from a natural material into a technological raw material. Therefore, the application of existing technological drying modes to wood damaged by fire is impractical. It is impossible to carry out the processes of dehydration or humidification of wood without information about the value of its moisture conductivity. The moisture conductivity of wood is determined by the moisture conductivity coefficient. The value of the moisture conductivity coefficient of samples of fire-damaged and undamaged *P. sylvestris* heartwood extracted from the stemwood was determined by the method of stationary moisture flow in the radial and tangential directions. In comparison with the intact Scots pine wood, wood damaged by fire has an inverse dependence of the intensity of the moisture current – in the tangential direction it is higher than in the radial direction. There is a general decrease in the moisture conductivity coefficient of pine wood: in the radial direction – by $40.2 \pm 1.58\%$ ($p < 0.05$), in the tangential direction – by $14.5 \pm 0.92\%$ ($p < 0.05$) compared with intact wood. Patterns of changes in the value of the heartwood coefficient of moisture conductivity in standing pine, damaged by fire, will allow to adjust the existing drying modes and improve the quality of the dried wood and the efficiency of the softwood kiln drying technology.

Keywords: *moisture conductivity coefficient, wood moisture, standing timber, softwood, heartwood, Pinus sylvestris* L., *method of stationary moisture current, diffuse moisture current, wildfire, drying, running crown fire, surface fire*

Funding: this research received no external funding.

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

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

Для цитирования: Platonov A. D., Snegireva S. N., Kantieva E. V., Kiseleva A. V. Heartwood moisture conductivity of standing pine damaged by running crown and strong surface wildfire. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 4 (52), part 1, pp. 191-208 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/12>.

Received 04.12.2023. **Revised** 14.12.2023. **Accepted** 16.12.2023. **Published online** 29.12.2023.

Введение

Ежегодно в мире повреждается пожарами большое количество лесных насаждений [24, 28]. Степень повреждения насаждения пожаром зависит от многих факторов [23]. Наибольшее влияние на стойкость насаждений при воздействии высокой температуры пожара оказывают условия произрастания. Как показывает практика, стойкость насаждений в более влажных условиях произрастания, особенно в высокой широтной зональности существенно выше [30], чем в южных более засушливых регионах, и особенно в лесостепной зоне*. Степень повреждения деревьев во многом зависит и от их возраста [29]. Чем больше возраст насаждения, тем выше стойкость деревьев к воздействию высокой температуры пожара. Большое влияние на степень повреждения насаждений оказывает вид пожара. Наибольший урон насаждениям наносит сильный низовой и повальный верховой пожар, наименьший – слабый низовой.

Действие пожара на ствол дерева различно. Однако при всех видах пожара наибольшее воздействие высокой температуры приходится на нижнюю, наиболее ценную часть ствола. Из общего количества пожаров в лесостепной зоне России преобладают сильные низовые пожары. В результате этого вида пожара выгорает подлесок, что способствует наиболее длительному воздействию высокой температуры на комлевую часть ствола (рис. 1).

Мониторинг состояния древостоев в лесостепной зоне РФ, после повреждения пожаром показал их невысокую биологическую стойкость. Уже через год после пожара отмечают повреждение древесины насекомыми. В результате воздействия высокой температуры происходит активное парообразование свободной влаги в древесине и повышение

давления паровоздушной смеси. Высокое давление паровоздушной смеси вызывает разрушение структуры некоторых анатомических элементов древесины, нарушению целостности тканей, а также интенсивное образование смолы, что приводит к сильному засмолению древесины. Наиболее сильное засмоление древесины отмечено в зоне ствола, подвергшейся воздействию высокой температуры, особенно в нижней его части. На стволе дерева в зоне поражения кора имеет сильный нагар. Это может служить хорошим диагностическим признаком предварительной оценки качества древесины перед её раскромом на сортименты.



Рисунок 1. Древостой сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.), поврежденный сильным низовым и беглым верховым пожаром

Figure 1. *P. sylvestris* L. stand damaged by a strong surface fire and running crown fire

Источник: собственное фото авторов
Source: authors' own photos

Мониторинг состояния древостоев в лесостепной зоне РФ после повреждения пожаром показал их невысокую биологическую стойкость. Уже

* Демаков, Ю. П. Лесоводство. Ведение хозяйства в лесах, пораженных пожарами: / Ю. П. Демаков, К. К. Калинин. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2003. 135 с.

через год после пожара отмечают повреждение древесины насекомыми. В результате воздействия высокой температуры происходит активное парообразование свободной влаги в древесине и повышение давления паровоздушной смеси. Высокое давление паровоздушной смеси вызывает разрушение структуры некоторых анатомических элементов древесины, нарушению целостности тканей, а также интенсивное образование смолы, что приводит к сильному засмолению древесины. Наиболее сильное засмоление древесины отмечено в зоне ствола, подвергшейся воздействию высокой температуры, особенно в нижней его части. На стволе дерева в зоне поражения кора имеет сильный нагар. Это может служить хорошим диагностическим признаком предварительной оценки качества древесины перед её раскроем на сортименты.

Воздействие высокой температуры оказывает существенное влияние на физико-механические свойства древесины [31]. У древесины, поврежденной пожаром, изменяются гигроскопические свойства. Существенно понижается предел гигроскопичности древесины, её тепловые свойства. Повышенная засмоленность древесины оказывает влияние на её плотность и механические показатели.

В ВГЛТУ выполнены исследования на древесине сосны, произрастающей в сухих борах лесостепной зоны России, после повреждения сильным низовым и беглым верховым пожаром [2-4]. В результате длительного мониторинга установлено, что у древесины в насаждениях, расположенных в сухих борах лесостепной зоны, после повреждения пожаром происходит снижение прочностных свойств гораздо быстрее, чем у древесины в насаждениях, произрастающих во влажных борах севера европейской части России. В течение 19 месяцев древесина сохраняет свои прочностные свойства на уровне¹, допустимом для её использования в качестве конструкционного или технологического материала. Такая древесина, поврежденная пожаром, может быть рекомендована к применению без ограничений

¹ Макаров, А.В. Технические качества древесины, пораженной различными видами пожара // Лесотехнический журнал. – 2011. - № 4. - С. 14-18.

² Арциховская, Н. В. Исследование влагопроводности древесины / Н. В. Арциховская // Труды института леса. – М. : Изд-во АН СССР, 1957. – Т. 9. – С. 127-157

[1, 4]. После указанного срока стояния на корню происходит существенное снижение прочностных показателей древесины.

В настоящее время поврежденная пожаром древесина в деревоперерабатывающей промышленности практически не используется. Одной из основных причин этого является слабая изученность её свойств. Используемые технологические процессы не в полной мере могут быть применимы при обработке древесины, поврежденной пожаром без учета особенностей её свойств.

Одним из первичных процессов в технологии переработки древесины является её обезвоживание [6]. Сушка древесины улучшает её качество, предотвращает порчу от загнивания, предупреждает деформацию и размероизменяемость деталей и др. [7]. Проведение процессов обезвоживания или увлажнения древесины, невозможно без сведений о величине её влагопроводности^{2,3}. Показатель влагопроводности древесины определяется коэффициентом её влагопроводности. Коэффициент влагопроводности является основным показателем, характеризующим интенсивность потока влаги внутри древесины. Он характеризует количество влаги, перемещаемое в единицу времени через единицу площади при разности концентрации влаги в 1 кг/м^3 на 1 м толщины⁴.

Несмотря на то, что изучением передвижения влаги в твердых гигроскопических телах занималось немало исследователей, полной ясности в этом вопросе нет и до настоящего времени. Это можно объяснить тем, что на процесс передвижения влаги в древесине, особенно в процессе ее высыхания, оказывает влияние большое количество зависимых и независимых величин. Наибольшее влияние на влагопроводность древесины оказывают её порода [19, 21], направление тока влаги, температура [27], плотность и твердость [20, 26] и др. Из всех указанных факторов наибольшее влияние на интенсивность тока влаги в древесине оказывает темпера-

³ Алпаткина, Р. П. О влагопроводности древесины важнейших отечественных пород/ Деревообр. пром-сть. 1967. № 9. С. 12-14.

⁴ Серговский, П. С. Расчет процессов высыхания и увлажнения древесины. – М. : Гослесбумиздат, 1952. – 75 с.

тура. При повышении температуры влагопроводность древесины существенно возрастает. Перенос влаги в древесине ниже точки насыщения волокон является сложным процессом и зависит от изменчивости микро- и макроскопических свойств древесины [8].

Исследованием влагопроводности древесины занимались ученые в разное время. Большое количество исследований выполнено во второй половине 20 века. Вопросам влагопроводности древесины сосны посвящены исследования, выполненные Мартлеем Д.Ф. и Эгнером. Вполне достоверными можно считать данные, полученные Арциховской Н.В., Алпаткиной Р.П., Лыковым А.В. Серговским П.С. и др. Полученные этими учеными численные значения коэффициента влагопроводности подтверждают теоретическое предположение о том, что коэффициент влагопроводности в области ниже точки насыщения волокна изменяется с изменением влажности весьма незначительно и может приниматься постоянным при неизменной температуре [8].

В последнее время в научной литературе большое внимание уделяют вопросам моделирования процессов диффузии влаги в древесине. К настоящему времени разработано множество теоретических моделей сушки древесины и других спецификаций, связанных с этим процессом [9, 10, 11]. В основе моделирования процессов переноса влаги в древесине ниже точки насыщения волокон используют первый закон Фика для стационарных процессов диффузии и второй закон Фика для описания переходных процессов в древесине, при получении универсальной модели процессов переноса влаги в древесине ниже точки насыщения волокон [12]. Существующие модели диффузии влаги в древесине построены на определенных допущениях, которые с большой долей приближения учитывают микро- или макроструктуру древесины и основаны на «элементарной ячейке» трахеиды, связывают коэффициентом диффузии с макроскопической структурой и плотностью древесины, её температурой и содержанием влаги и др. [13, 14, 17, 18].

Имеются сведения по применению технических средств для ускорения определения величины перепада влажности по толщине образцов при определении величины коэффициента влагопроводности.

В работе [15] распределение послойной влажности в древесине определялись в процессе сушки методом рентгенокопии. Однако полученные данные позволили рассчитать лишь средние значения коэффициентов влагопроводности в радиальном направлении. Для практики важны значения влагопроводности древесины в радиальном и тангенциальном направлениях, Исследование тока влаги вдоль волокон древесины важны при построении режимов сушки для небольших деталей и заготовок [14, 16].

Точность моделей, описывающих диффузию влаги в древесине, во многом зависит от границ принятых допущений рассматриваемых критериев. Принятая во многих моделях «элементарная ячейка» не в полной мере отражает разнообразие микроструктуры и особенностей анатомических элементов в древесине их размеры и количественное соотношение. Принятые допущения недостаточны для описания процесса влагопроводности в древесине сосны, имеющей наиболее простое и упорядоченное строение. Ни одна из известных моделей не учитывает наличие пороков строения древесины, условия произрастания и другие не менее значимые факторы, влияющие на движение диффузной влаги в древесине.

Воздействие высокой температуры пожара оказывает воздействие на микро и макроструктуру древесины и её физико-механические свойства. Происходит нарушение целостности древесины, разрушение структуры анатомических элементов. В результате этого внешнего воздействия температуры в древесине активно протекают процессы смолообразования. Степень и характер этих разрушений, а также интенсивность протекания процесса засмоления древесины весьма затруднительно описать даже с учетом различных допущений. Стоит отметить, что применяемое в моделях допущение структуры древесины как «элементарная ячейка» не учитывает в полном объеме особенности микроструктуры и анизотропии строения даже у неповрежденной древесины. Поэтому задача получения универсальной модели, описывающей процесс перемещения диффузной влаги в древесине, даже для одной группы пород представляется крайне сложной.

Наиболее простым решением задачи определения величины коэффициента влагопроводности

древесины, поврежденной пожаром, является экспериментальный метод стационарного тока влаги. Сведения о влагопроводности древесины сосны, поврежденной пожаром, отсутствуют в технической литературе. В связи с чем, целью данного исследования является установление величины коэффициента влагопроводности ядровой древесины сосны, поврежденной низовым пожаром.

Материалы и методы

Объект и предмет исследования

Исследование влагопроводности выполняли на древесине сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающей на территории учебно-опытного лесхоза Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова (УОЛ ВГЛТУ) в Воронежской области. Для исследования были выбраны деревья одной возрастной группы, не поврежденные пожаром, и поврежденные сильным низовым и беглым верховым пожаром.

Предмет исследования составил коэффициент влагопроводности образцов из поврежденной пожаром и неповрежденной древесины *P. sylvestris* в тангенциальном и радиальном направлениях.

Дизайн эксперимента

Из свежесрубленной древесины ствола были выпилены диски толщиной 60 мм на высоте ствола 1,3 м. Затем из каждого диска были выпилены образцы размером 30×30×30 мм и высушены до абсолютно сухого состояния. Схема мест выпилки образцов из диска представлена на рис. 2.

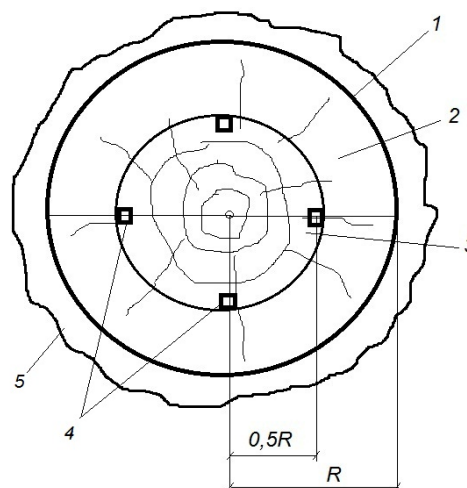


Рисунок 2. Схема выпилки образцов:

1) камбий; 2) заболонь; 3) ядро; 4) места отбора образцов; 5) кора

Figure 2. Sample sawing scheme:

1) cambium; 2) sapwood; 3) core; 4) sampling sites; 5) bark

Источник: собственная композиция авторов

Source: authors' own photo

Размеры образцов измеряли штангенциркулем с погрешностью $\pm 0,05$ мм. Коэффициент влагопроводности был определен методом стационарного тока влаги ядровой древесины в радиальном и тангенциальном направлениях по методике разработанной В.Н. Арциховской⁵. Схема установки представлена на рис. 3.

⁵ Арциховская, Н. В. Исследование влагопроводности древесины / Н. В. Арциховская // Труды института леса. – М. : Изд-во АН СССР, 1957. – Т. 9. – С. 127-157

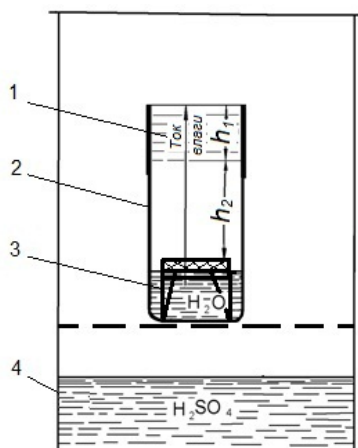


Рисунок 3. Схема установки для определения коэффициента влагопроводности древесины методом стационарного тока влаги:

- 1) образец древесины; 2) бюкса с образцом; 3) марля на треноге из проволоки; 4) эксикатор с серной кислотой; h_1) толщина образца; h_2) расстояние от марли до поверхности образца

Figure 3. Installation diagram for determining the moisture conductivity coefficient of wood by the method of stationary moisture current:

- 1) a sample of wood; 2) a bux with a sample; 3) gauze on a wire frame; 4) a desiccator with sulfuric acid; h_1) the thickness of the sample; h_2) the distance from the gauze to the surface of the sample

Источник: Арциховская, Н. В. Исследование влагопроводности древесины / Н. В. Арциховская // Труды института леса. – М. : Изд-во АН СССР, 1957. – Т. 9. – С. 127-157

Source: Artsikhovskaya, N. V. Investigation of moisture pipeline-wood news / N. V. Artsikhovskaya // Proceedings of the Forest Institute. – M. : Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1957. – Vol. 9. – pp. 127-157

Боковые стенки образцов изолировали от окружающей среды (рис. 4). Это обеспечивало направленный ток влаги в образцах. После этого каждый образец закрепляли в стеклянном стакане, на дно которых была налита дистиллированная вода. Обеспечение постоянного давления водяного пара у нижней части образца возможно за счет поддержания постоянного расстояния между нижней частью образца древесины и уровнем поверхности, испаряющей влагу.



Рисунок 4. Внешний вид образца древесины в стакане

Figure 4. Appearance of a sample of wood in a glass

Источник: собственные фото авторов

Source: authors' own photos

В эксперименте это было достигнуто установкой треноги из медной проволоки диаметром 0,8 мм поверх которой размещена марля в четыре слоя. Затем стаканы с образцами помещали в эксикаторы, на дно которых была налита серная кислота. Серная кислота обеспечивала в эксикаторе влажность воздуха, близкую к абсолютно сухому состоянию. Один из эксикаторов был помещен в шкаф при температуре 20 °С, а другой в шкаф при температуре 60 °С.

В результате разности парциальных давлений пара в стаканчике и эксикаторе через образец происходит движение влаги. Каждые 24 часа производили контроль количества влаги, прошедшей через образцы путем их взвешивания. Прошедшую через образцы влагу поглощала серная кислота. По мере поглощения влаги концентрация серной кислоты в эксикаторах понижалась. По мере необходимости производили замену серной кислоты в эксикаторах. После установления постоянной убыли влаги через образцы их извлекали из эксикатора и раскалывали на пластины. Затем измеряли толщину каждой пластины штангенциркулем, взвешивали и определяли влажность каждой из них весовым методом. Градиент влажности du/dx определяли графическим методом.

Анализ данных

Численные значения коэффициента влагопроводности D , $\text{м}^2/\text{с}$ определяли по формуле

$$D = \frac{M}{F \cdot \rho_o \frac{du}{dx}}, \quad (1)$$

где M – количество влаги, прошедшей через древесину за 1 с, кг;

F – площадь поверхности образца, перпендикулярная к направлению тока влаги, м^2 ;

ρ_o – плотность древесины в абсолютно сухом состоянии, $\text{кг}/\text{м}^3$;

du/dx – градиент влажности, м^{-1} .

Результаты

На рис. 5-8 представлены значения величины коэффициента влагопроводности образцов древесины сосны, в радиальном и тангенциальном направлениях тока влаги, в зависимости от её влажности.

Величина коэффициента влагопроводности в радиальном направлении при температуре $20\text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 5) у древесины сосны, поврежденной пожаром в интервале влажности от 6 % до 17 % изменяется незначительно в пределах $1,8\text{-}2,1 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$. При сни-

жении влажности менее 6 % отмечается резкое повышение коэффициента влагопроводности. Наибольшей величины коэффициент влагопроводности достигает $3,0 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ при влажности 3,5-4,0 %. Максимальная величина гигроскопической влаги в древесине не превышает 17 %. Величина коэффициента влагопроводности у неповрежденной древесины изменяется в диапазоне от $2,9 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ до $3,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$. Максимальная величина гигроскопической влаги в древесине не превышает 22 %.

Величина коэффициента влагопроводности в тангенциальном направлении при температуре $20\text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 6) у древесины сосны, поврежденной пожаром в интервале влажности от 12 % до 18 % изменяется незначительно в пределах $1,8\text{-}2,0 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$. В интервале влажности древесины от 3 % до 12 % отмечается резкое повышение коэффициента влагопроводности, в среднем на 75 % достигает наибольшей величины $3,0 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ при влажности 6,0 %. Максимальная послойная влажность древесины не превышает 18 %. Величина коэффициента влагопроводности у неповрежденной древесины в тангенциальном направлении изменяется в диапазоне от $0,25 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ до $1,0 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$. Максимальная величина гигроскопической влаги в древесине не превышает 24 %.

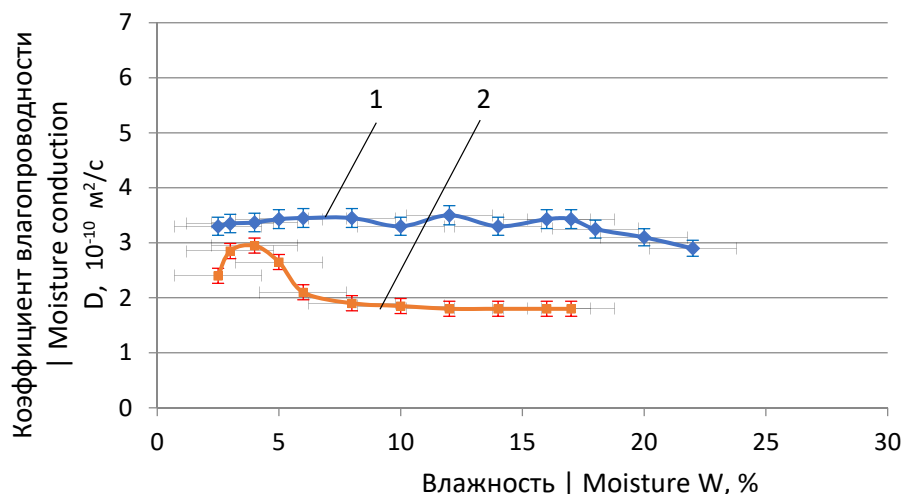


Рисунок 5. Коэффициент влагопроводности древесины сосны в радиальном направлении из комлевой части ствола, в зависимости от влажности при температуре $20\text{ }^\circ\text{C}$

1) неповрежденная древесина; 2) древесина, поврежденная пожаром

Figure 5. Coefficient of moisture conductivity of pine wood in the radial direction from the butt part of the trunk, depending on humidity at a temperature of $20\text{ }^\circ\text{C}$

1) undamaged wood; 2) wood damaged by fire

Источник: собственные результаты авторов

Source: own results

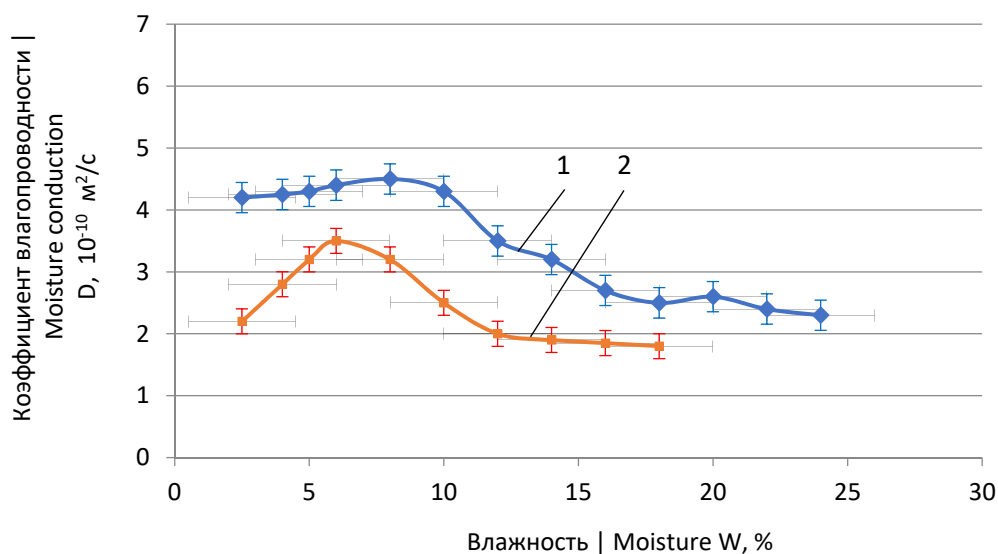


Рисунок 6. Коэффициент влагопроводности древесины сосны в тангенциальном направлении из комлевой части ствола, в зависимости от влажности при температуре 20 °С

1) неповрежденная древесина; 2) древесина, поврежденная пожаром

Figure 6. The coefficient of moisture conductivity of pine wood in the tangential direction from the butt part of the trunk, depending on humidity at a temperature of 20 °С

1) intact wood; 2) wood damaged by fire

Источник: собственные результаты авторов

Source: own results

Влагопроводность древесины при повышении температуры существенно возрастает. Коэффициент влагопроводности у неповрежденной древесины сосны в радиальном направлении при температуре 60 °С (рис. 7) с уменьшением влажности повышается с $4,2 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ до $8,8 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$. Незначительное снижение величины влагопроводности древесины отмечено при влажности около 8 %. Максимальная послойная влажность древесины не превышает 16 %. Величина коэффициента влагопроводности у неповрежденной древесины в радиальном направлении при температуре 60 °С с уменьшением влажности возрастает с $5,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ до $13,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$. Максимальная величина гигроскопической влаги в древесине не превышает 22 %.

Коэффициент влагопроводности у неповрежденной древесины сосны в тангенциальном направлении при температуре 60 °С (рис. 8) с уменьшением влажности повышается с $4,4 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ до $8,8 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$. Незначительное снижение величины влагопроводности древесины отмечено при влажности около менее 4 %. Максимальная послойная влажность древесины не превышает 16 %. Величина коэффициента влагопроводности у неповрежденной древесины в радиальном направлении при температуре 60 °С с уменьшением влажности возрастает с $4,2 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ до $12,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$. Незначительное повышение величины коэффициента влагопроводности отмечается при влажности древесины 10 % и 18 %. Максимальная величина гигроскопической влаги в древесине не превышает 22 %.

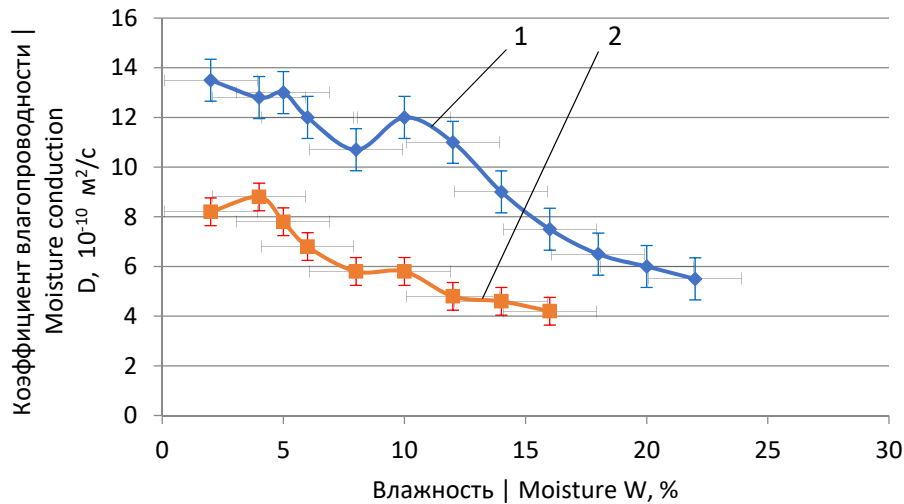


Рисунок 7. Коэффициент влагопроводности древесины сосны в радиальном направлении из комлевой части ствола, в зависимости от влажности при температуре 60 °С

1) неповрежденная древесина; 2) древесина, поврежденная пожаром

Figure 7. Coefficient of moisture conductivity of pine wood in the radial direction from the left side of the trunk, depending on humidity at a temperature of 60 °С

1) intact wood; 2) wood damaged by fire

Источник: собственные результаты авторов

Source: own results

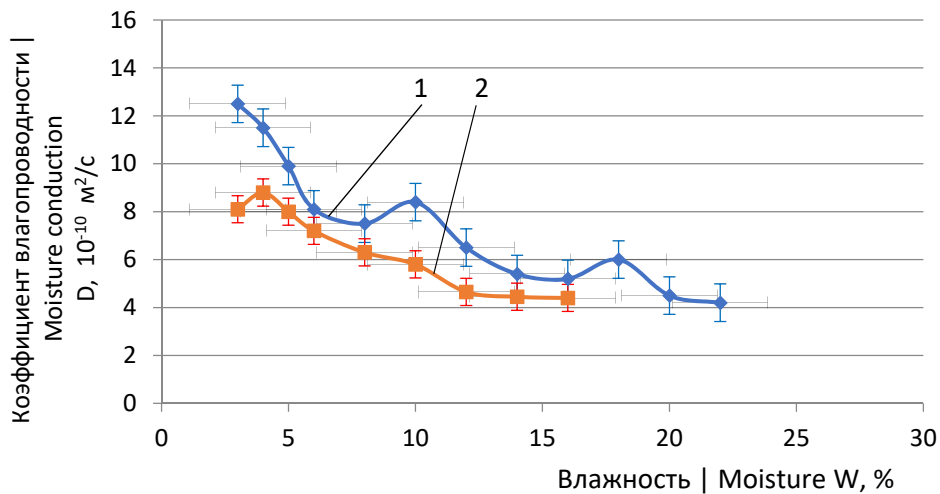


Рисунок 8 – Коэффициент влагопроводности древесины сосны в тангенциальном направлении из комлевой части ствола, в зависимости от влажности при температуре 60 °С

1) неповрежденная древесина; 2) древесина, поврежденная пожаром

Figure 8. Coefficient of moisture conductivity of pine wood in the tangential direction from the butt part of the trunk, depending on humidity at a temperature of 60 °С

1) intact wood; 2) wood damaged by fire

Источник: собственные результаты авторов

Source: own results

Повышение температуры способствует значительному возрастанию величины перепада величины влагопроводности древесины. В радиальном направлении величина перепада коэффициента влагопроводности у древесины, поврежденной пожаром при температуре 20 °С составляет 1,64 раза, а при температуре 60 °С 2,1 раза, соответственно у неповрежденной древесины 1,2 раза и 2,45 раза. В тангенциальном направлении величина перепада коэффициента влагопроводности у древесины, поврежденной пожаром при температуре 20 °С составляет 1,94 раза, а у неповрежденной в 2,0 раза, при температуре 60 °С соответственно у неповрежденной древесины в 2,0 раза и в 2,84 раза.

Коэффициент влагопроводности у неповрежденной древесины сосны в радиальном направлении при температуре 60 °С повышается с уменьшением влажности древесины от $5,5 \cdot 10^{-10}$ м²/с до $13,5 \cdot 10^{-10}$ м²/с. Незначительное снижение величины влагопроводности отмечено при влажности около 8 %.

С повышением температуры у древесины, поврежденной пожаром, величина перепада коэффициента влагопроводности, в зависимости от влажности возрастает незначительно, а у неповрежденной древесины существенно, как в радиальном, так и в тангенциальном направлениях. Закономерности изменения величины коэффициента влагопроводности в зависимости от влажности древесины позволят скорректировать существующие режимы сушки обоснования границы переходной влажности и выбора рациональной влажности древесины, обеспечивающей наибольший ток влаги в древесине.

Большое практическое значение имеет величина средней величины коэффициента влагопроводности при различной температуре. Для древесины сосны, произрастающей в Воронежской области средние значения коэффициента влагопроводности при температуре 20 °С составили в радиальном направлении $3,4 \cdot 10^{-10}$ м²/с, а в тангенциальном 2,97 м²/с. При температуре 60 °С - 9,8 м²/с и 7,5 м²/с соответственно. После воздействия высокой темпера-

туры пожара средняя величина коэффициента влагопроводности уменьшилась в радиальном направлении на 36,2 % до величины $2,17 \cdot 10^{-10}$ м²/с, в тангенциальном на 14,5 % до величины $6,5 \cdot 10^{-10}$ м²/с. При температуре 60 °С снижение составило в радиальном направлении 41,3 % до $5,75 \cdot 10^{-10}$ м²/с, а в тангенциальном на 13,3 %, до 6,5 м²/с.

У неповрежденной пожаром древесины величина коэффициента влагопроводности в радиальном направлении выше, чем в тангенциальном. Данное различие обусловлено микроструктурой древесины (рис. 9). В радиальном направлении больший ток влаги происходит за счет сердцевинных лучей, имеющих радиальное расположение в стволе дерева. После воздействия пожара в древесине больший ток влаги, а, следовательно, и величина коэффициента влагопроводности отмечена в тангенциальном направлении. Изменение интенсивности тока влаги произошло вследствие засмоления древесины при воздействии высокой температуры пожара (рис. 9). Наибольшая степень засмоления отмечена в ранней зоне годичного слоя, а также сердцевинных лучей. Засмоление древесины, в том числе и сердцевинных лучей существенно понизило ток влаги в радиальном направлении.

Меньшее снижение тока влаги в тангенциальном направлении обусловлено тем, что при воздействии высокой температуры в древесине произошло повышение давления паровоздушной смеси, в результате чего были разрушены торусы окаймленных пор трахеид. Наибольшее количество окаймленных пор расположено на радиальных стенках трахеид, что и повлияло на повышение тока влаги в тангенциальном направлении.

Для инженерных расчетов значения коэффициента влагопроводности древесины сосны, в зависимости от температуры представлены в виде графиков на рис. 10. В радиальном направлении снижение тока влаги радиальном направлении в древесине, поврежденной пожаром, составило $40,2 \pm 1,58$ % ($p < 0,05$), а снижение тока влаги в тангенциальном направлении не превышает $14,5 \pm 0,92$ % ($p < 0,05$).

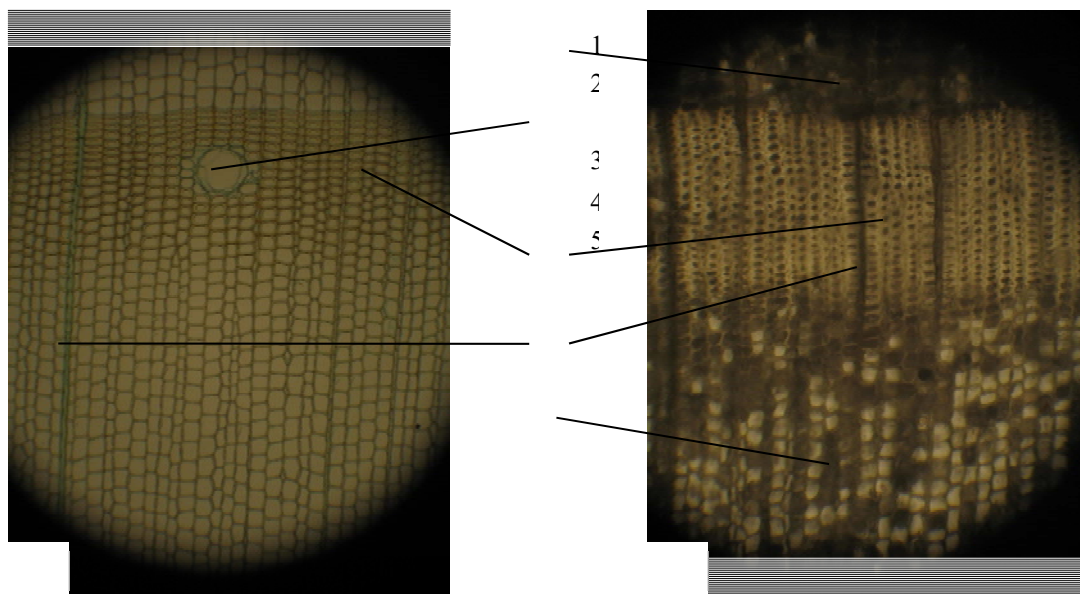


Рисунок 9. Поперечный срез неповрежденной (а) и поврежденной пожаром (б) древесины сосны: 1) ранняя древесина; 2) смоляной ход; 3) поздняя древесина; 4) сердцевинный луч; 5) засмоленная древесина

Figure 9. Cross section of intact (a) and fire-damaged (b) pine wood:

1) early wood; 2) resin stroke; 3) late wood; 4) core beam; 5) tarred wood

Источник: собственные фото авторов

Source: authors' own photos

Анализ результатов исследования коэффициента влагопроводности неповрежденной древесины сосны при температуре 20 °С показывает, что интенсивность перемещения диффузной влаги в радиальном направлении практически не зависит от влажности древесины. В тангенциальном направлении влажность оказывает заметное влияние на интенсивность тока влаги внутри древесины. С уменьшением влажности ток диффузной влаги возрастает. Однако, в среднем, величина влагопроводности древесины в тангенциальном направлении меньше, чем в радиальном. Данное различие тока влаги следует учитывать при атмосферной сушке [22] обрезных пиломатериалов. При сушке пиломатериалов в виде досок будет преобладать ток влаги в радиальном направлении, то есть по их толщине. Поэтому интенсивность высыхания досок будет относительно равномерной. При высушивании пиломатериалов в виде брусков интенсивность высыхания будет в большей степени зависеть от влажности древесины. Большее влияние на скорость тока будет оказывать

передвижение влаги в тангенциальном направлении, особенно при влажности древесины менее 18-20 %.

Обсуждение

Интенсивность тока влаги у древесины, поврежденной пожаром, меньше, чем у неповрежденной древесины, поэтому продолжительность высыхания этой древесины будет более длительной по времени. Кроме этого, интенсивность тока влаги в тангенциальном направлении выше, чем в радиальном по сравнению с неповрежденной древесиной. Продолжительность сушки пиломатериалов в виде досок из древесины сосны, поврежденной пожаром, будет существенно больше по сравнению с неповрежденной древесиной. Продолжительность сушки пиломатериалов в виде брусков будет меньше, по сравнению с продолжительностью сушки досок. Значительное увеличение интенсивности тока влаги в радиальном направлении у древесины, поврежденной пожаром, отмечено при влажности менее 5 %, а в тангенциальном направлении при влажности менее 8-10 %. При высушивании пиломатериалов в

виде досок, целесообразным будет не понижать влажность древесины на поверхности досок до влажности менее 5 %, а при сушке брусьев менее 8-10 %. Понижение влажности древесины менее указанных величин приведет к возрастанию тока влаги

в поверхностных слоях пиломатериалов, более интенсивному её испарению, возрастанию величины внутренних напряжений и образованию трещин.

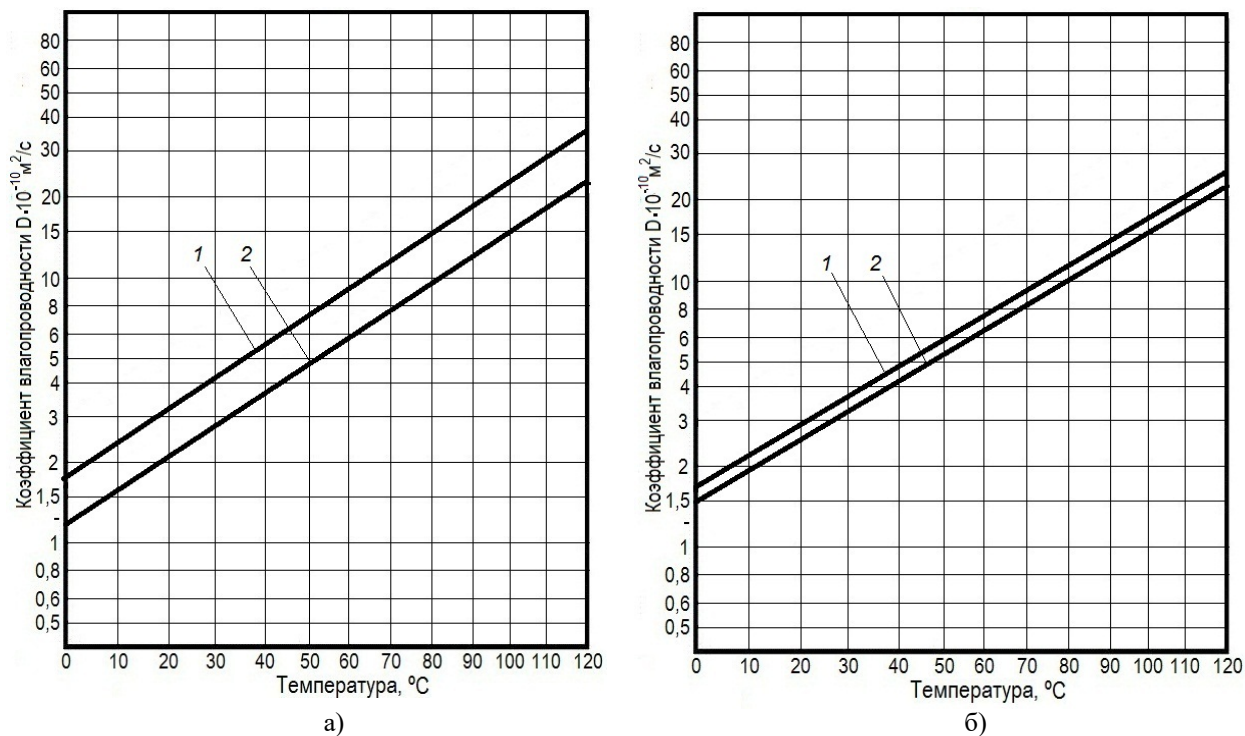


Рисунок 10. Коэффициент влагопроводности древесины сосны в радиальном (а) и тангенциальном (б) направлениях:

1) неповрежденная древесина; 2) древесина, поврежденная пожаром

Figure 10. The coefficient of moisture conductivity of pine wood in the radial (a) and tangential (b) directions:

1) intact wood; 2) wood damaged by fire

Источник: собственные результаты авторов

Source: own results

Анализ результатов исследования коэффициента влагопроводности неповрежденной и поврежденной пожаром древесины сосны при температуре 60°C показывает, что интенсивность перемещения диффузной влаги как в радиальном, так и тангенциальном направлениях зависит от влажности древесины (рис. 10), по сравнению с температурой среды 20°C . С уменьшением влажности, когда в древесине начинает преобладать движение влаги в виде пара, отмечается увеличение величины коэффициента влагопроводности древесины сосны.

В процессе камерной сушки у пиломатериалов в виде досок преобладать ток влаги в радиальном направлении, то есть по их толщине, по сравнению с током влаги в тангенциальном направлении – по ширине. При высушивании пиломатериалов в виде досок интенсивность высыхания будет выше, по сравнению с пиломатериалами в виде брусков при равном гидравлическом радиусе у рассматриваемых сортиментов. С уменьшением влажности древесины будет возрастать ток влаги в поверхностных слоях пиломатериалов. Вследствие этого следует ограничивать величину интенсивности испарения

влаги с поверхности древесины и не допускать большого перепада влажности у высушиваемых пиломатериалов.

Значительное увеличение интенсивности тока влаги в радиальном направлении у древесины, поврежденной пожаром при повышении температуры до 60 °С отмечено при влажности древесины менее 8 %, а в тангенциальном направлении при влажности менее 12 %. При высушивании пиломатериалов в виде досок, целесообразным будет не понижать влажность древесины на поверхности досок до влажности менее 5 %, а при сушке брусьев менее 8-10 %. Понижение влажности древесины менее указанных величин приведет к возрастанию тока влаги в поверхностных слоях пиломатериалов, более интенсивному испарению влаги с поверхности древесины, и как следствием этого, к увеличению перепада влажности и образованию больших внутренних напряжений.

Выводы

Воздействие высокой температуры на древесину понижает её гигроскопические свойства. Величина влагопоглощения снижается на 22-26 %.

У неповрежденной древесины интенсивность тока влаги в радиальном направлении выше, чем тангенциальном. У древесины сосны, поврежденной пожаром, наоборот выше интенсивность тока влаги в тангенциальном направлении. Вследствие засмоленности древесины происходит снижение величины её коэффициента влагопроводности в радиальном направлении в среднем на 40,0 %, в тангенциальном – в среднем на 14,5 % по сравнению с неповрежденной древесиной сосны.

Закономерности изменения величины коэффициента влагопроводности в зависимости от влажности древесины позволят скорректировать существующие режимы сушки и повысить скорость тока влаги в древесине.

Список литературы

1. Фуряев, И. В. Пожароустойчивость насаждений южно-таежных лесов Западно- Сибирской равнины и средне-Сибирского плоскогорья // *Sciences of Europe*. 2021; 64-3: 26-29. URL: <https://elibrary.ru/MQJAAZ>.
2. Снегирева, С. Н. Влагопоглощение заболонной древесины сосны, поврежденной пожаром / С. Н. Снегирева, А. Д. Платонов, Е. В. Кантиева // *Подготовка кадров в условиях перехода на инновационный путь развития лесного хозяйства*. – Воронеж, 2021: 264-267. – URL: <https://elibrary.ru/FXVJCN>.
3. Снегирева, С.Н. Формирование поздней древесины сосны, поврежденной пожаром / Снегирева С.Н., Платонов А.Д., Кеян Н.Г. // *Разработка энергоресурсосберегающих и экологически безопасных технологий лесопромышленного комплекса*. Воронеж, 2022: 81-84. URL: <https://elibrary.ru/gawptt>.
4. Курьянова, Т.К. и др. Длительность сохранения прочностных свойств древесины, поврежденной пожаром // *Строение, свойства и качество древесины-2014*. М., 2014: 28-29. URL: <https://www.elibrary.ru/trxegz>.
5. Платонов, А. Д. Исследование влагопроводности древесины после химической обработки / А. Д. Платонов, Т. К. Курьянова // *Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник*. 2005; 2: 56-63. URL: <https://www.elibrary.ru/PGFZUN>.
6. Сотникова, М. А. Разработка методов и процессов обезвоживания древесины и древесных отходов / М. А. Сотникова, В. А. Соколова // *Актуальные проблемы развития лесного комплекса*. Вологда, 2019: 178-181. URL: <https://www.elibrary.ru/IRRYUD>.
7. Определение минимальной высоты источника выбросов из камеры при сушке древесины бука / Ю.С. Михайлова [и др.] // *Лесотехнический журнал*. 2019; 9 (36): 117-125. <https://elibrary.ru/SCFLPI>.
8. Платонов, А.Д. Структура и физико-механические свойства химически обработанной древесины трудносохнущих пород. Воронеж, 2005: 125. <https://elibrary.ru/qnjhbd>.
9. Zhan, T. Moisture diffusion properties of graded hierarchical structure of bamboo: Longitudinal and radial variations / T. Zhan, F. Sun, C. Lyu et al. // *Construction and Building Materials*. 2020; 259: 119641. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119641>.

10. Afshari, Z. Moisture Transport in Laminated Wood and Bamboo Composites Bonded with Thin Adhesive Layers – a Numerical Study / Z. Afshari, S. Malek // SSRN Electronic Journal. – 2022. – DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4026076>.
11. A.A. Chiniforusha, H.Valipourb, A.Akbarnezhada. Water vapor diffusivity of engineered wood: Effect of temperature and moisture content. Construction and Building Materials. Volume 224, 10 November 2019, Pages 1040-1055.
12. A K.Hofstetter. Comprehensive model for transient moisture transport in wood below the fiber saturation point: Physical background, implementation and experimental validation. International Journal of Thermal Sciences Volume 50, Issue 10, October 2011, pages 1861-1866
13. J. Eitelberger, K. Hofstetter. Prediction of transport properties of wood below the fiber saturation point – A multiscale homogenization approach and its experimental validation. Part II: Steady state moisture diffusion coefficient. Composites Science and Technology Volume 71, Issue 2, 17 January 2011, Pages 145-151.
14. Экспериментальное определение влагопроводности образцов из сосны в продольном направлении при конвективной сушке / Ю. А. Гостеев, Ю. Г. Коробейников, А. В. Федоров, В. М. Фомин / Прикладная механика и техническая физика. 2003; 44 (3): 117-123. URL: <https://www.elibrary.ru/ooaqih>.
15. Определение коэффициента влагопроводности при низкотемпературной сушке древесины / И.В. Сапожников [и др.] // Лесной вестник. Forestry Bulletin. - 2016. - № 4. - С. 34-39. - URL: <https://www.elibrary.ru/wrjtcf>.
16. Рудак, А.Г. Исследование влагопроводности древесины сосны в различных структурных направлениях / А.Г. Рудак, Б.В. Снопков / Труды БГТУ. № 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность.- 2010. - № 2. - С. 180-183. <https://www.elibrary.ru/vbfmyl>.
17. Гороховский, А. Г. Конвективная сушка пиломатериалов на основе управляемого влагообмена / А. Г. Гороховский, Е. Е. Шишкина, А. С. Агафонов // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2022. – № 1(385). – С. 166-172. – DOI 10.37482/0536-1036-2022-1-166-172. <https://elibrary.ru/EUPCCA>.
18. Зарипов, Ш. Г. О влагообменных процессах при конвективной сушке в камерах периодического действия лиственных пиломатериалов / Ш. Г. Зарипов, В. А. Корниенко // Хвойные boreальной зоны. – 2021. – Т. 39, № 1. – С. 60-65. <https://elibrary.ru/mjhhvp>.
19. Влагопроводность древесины яблони / А. Д. Платонов, С. И. Волошин, С. Н. Снегирева [и др.] // Лесотехнический журнал. 2018; 8(32): 181-187. <https://elibrary.ru/vogoro>.
20. Platonov, A.D. Wood Quality along the Trunk Height of Birch and Aspen Growing in the Restoring Forests of Central Russia / A.D. Platonov, S.N. Snegireva, M. V. Drapalyuk et al. // Forests. 2022; 13 (11): 1758. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f13111758>.
21. Скуратов, Н. В. Паропроницаемость и влагопроводность термически модифицированной древесины ясеня / Н. В. Скуратов, Д. В. Усов, И. Г. Сергеев. Красноярск: ООО "Научно-инновационный центр", 2022: 113-115. <https://elibrary.ru/njkcdj>.
22. Влагопроводность древесины сосны, поврежденной пожаром, при атмосферной сушке / А. Д. Платонов, С. Н. Снегирева, Е. В. Кантиева [и др.] // Перспективные ресурсосберегающие технологии развития лесопромышленного комплекса. Воронеж, 2023: 126-129. – https://doi.org/10.58168/R-STDTIC2023_126-129. <https://elibrary.ru/DEFNQF>.
23. Динамика напочвенного покрова в биотопах сосновых лесов при фрагментации, вызванной пожарами, в условиях лесостепной зоны / В. Т. Попова, А. А. Попова, А. К. Кондратьева [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13, № 1(49). – С. 37-53. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2023.1/3. – <https://elibrary.ru/IJDFW>.
24. Прогнозная модель послепожарного лесовосстановления в Иркутской области / О. И. Григорьева, О. И. Гринько, И. В. Григорьев [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13, № 1(49). – С. 85-98. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2023.1/6. – <https://elibrary.ru/TLMULF>.
25. Kotelnikov, P. Application of the Benford law in assessment of wildfire data accuracy / P. Kotelnikov, A. Martynyuk // Forestry Engineering Journal. – 2018. – Vol. 8. – № 1. – P. 30-36. – DOI: https://doi.org/10.12737/article_5ab0dfbb946859.24647128.

26. Snegireva, S. Variability of the hardness of pine wood damaged by strong grassroots and rampant riding fire / S. Snegireva, A. Platonov, A. Kiseleva, E. Kantieva // *Forestry Engineering Journal*. – 2022. – Vol. 11. – № 4. – P. 79-87. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/7>.

27. Tyukavina, O. Heating capability of postpyrogen pine wood / O. Tyukavina, A. Gudina // *Forestry Engineering Journal*. – 2020. – Vol. 10. – № 2. – P. 188-195. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.2/19>.

28. Kendell, A. Wildfires: Introduction, Impact, Policy, and Planning / A. Kendell, A. Galloway, C. Milligan // *The Path of Flames: Understanding and Responding to Fatal Wildfires*. – Boca Raton : CRC Press, 2023. – P. 3-18. – DOI: <https://doi.org/10.4324/9781003168010-2>.

29. Erni, S. Stand Age Influence on Potential Wildfire Ignition and Spread in the Boreal Forest of Northeastern Canada / S. Erni, D. Arseneault, M.A. Parisien // *Ecosystems*. – 2018. – Vol. 21. – № 7. – P. 1471-1486. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-018-0235-3>.

30. Bryukhanov, A. V. Wildfire Impact on the Main Tree Species of the Near-Yenisei Siberia / A. V. Bryukhanov, A. V. Panov, E.I. Ponomarev, N. V. Sidenko // *Izvestiya - Atmospheric and Ocean Physics*. – 2018. – Vol. 54. – № 11. – P. 1525-1533. – DOI: <https://doi.org/10.1134/S0001433818110026>.

31. Goreshev, M.A. Determination of the Coefficient of Thermal and Moisture Conductivity of Wood by the Transient Moisture Current Method / M.A. Goreshev, F.G. Sekisov, O. V. Smerdov // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2018. – Vol. 91. – № 3. – P. 827-830. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10891-018-1805-0>.

References

1. Furyaev, I. V. Fire resistance of plantations of southern taiga forests of the West Siberian plain and the Central Siberian plateau // *Sciences of Europe*. 2021; 64-3: 26-29. URL: <https://elibrary.ru/MQJAAZ>.

2. Snegireva, S. N. Moisture absorption of sapwood pine damaged by fire / S. N. Snegireva, A.D. Platonov, E. V. Kantieva // *Personnel training in conditions of transition to an innovative way of forestry development*. – Voronezh

3. Snegireva, S.N. Formation of late pine wood damaged by fire / Snegireva S.N., Platonov A.D., Keyan N.G. // In the collection: *Development of energy-saving and environmentally safe technologies of the timber industry: materials of the International Scientific Conference of Scientists and students*. Editor S.N. Snegireva. - Voronezh, 2022. - pp. 81-84. Bibliogr.: p. 84. URL: <https://elibrary.ru/gawptt>

4. Kuryanova, T.K. Duration of preservation of strength properties of wood damaged by fire / T.K. Kuryanova, A.D. Platonov // In the book: *Structure, properties and quality of wood - 2014. Abstracts of the 5th RKSD International Symposium*. Moscow State University of Forest. - 2014. - pp. 28-29. Bibliogr.: p. 29.

5. Platonov, A.D. Investigation of moisture conductivity of wood after chemical treatment / A.D. Platonov, T. K. Kuryanova // *Bulletin of the Moscow State University of the Forest - Forest Bulletin* 2005; 2: 56-63. URL: <https://www.elibrary.ru/PGEFZUN>.

6. Sotnikova, M. A. Development of methods and processes for dewatering wood and wood waste / M. A. Sotnikova, V. A. Sokolova // *Actual problems of the development of the forest complex*. Vologda, 2019: 178-181. URL: <https://www.elibrary.ru/IRRYUD>.

7. Determination of the minimum height of the emission source from the chamber during drying of beech wood / Y.S. Mikhailova [et al.] // *Forestry Engineering Journal*. 2019; 9 (36): 117-125. <https://elibrary.ru/SCFLPI>.

8. Platonov, A.D. Structure and physico-mechanical properties of chemically treated wood of hard-drying rocks: monogr. / A.D. Platonov : Voronezh State Forestry Academy. – Voronezh : Voronezh State University, 2005. - 125 p. Bibliogr.: pp. 116-123. – ISBN 5-9273-0854-6

9. Tianyi Zhana, Fengze Suna, Chao Lyua, Qian Hea, Kang Xub, Yaoli Zhanga, Liping Caiac, Zhenhua Huangc, Jianxiong Lyub. Moisture diffusion properties of graded hierarchical structure of bamboo: Longitudinal and radial variations. *Construction and Building Materials*. Volume 259, 30 October 2020, 119641.

10. Zahra Afsharia, Sardar Malekab. Moisture transport in laminated wood and bamboo composites bonded with thin adhesive layers – A numerical study. *Construction and Building Materials*. Volume 340, 18 July 2022, 127597.

11. A.A.Chiniforusha, H.Valipourb, A.Akbarnezhada. Water vapor diffusivity of engineered wood: Effect of temperature and moisture content. *Construction and Building Materials*. Volume 224, 10 November 2019, Pages 1040-1055.
12. A K.Hofstetter. Comprehensive model for transient moisture transport in wood below the fiber saturation point: Physical background, implementation and experimental validation. *International Journal of Thermal Sciences* Volume 50, Issue 10, October 2011, pages 1861-1866
13. J. Eitelberger, K. Hofstetter. Prediction of transport properties of wood below the fiber saturation point – A multiscale homogenization approach and its experimental validation. Part II: Steady state moisture diffusion coefficient. *Composites Science and Technology* Volume 71, Issue 2, 17 January 2011, Pages 145-151.
14. Experimental determination of moisture conductivity of pine samples in the longitudinal direction during convective drying / Yu. A. Gosteev, Yu. G. Korobeynikov, A.V. Fedorov, V. M. Fomin / *Applied Mechanics and technical physics*. - 2003. - vol. 44, No. 3. - pp. 117-123. Bibliogr.: p. 123.
15. Determination of the coefficient of moisture conductivity during low-temperature drying of wood / I.V. Sapozhnikov [et al.] // *Lesnoy vestnik. Forestry Bulletin*. - 2016. - No. 4. - pp. 34-39. - URL: <https://rucont.ru/efd/480254>. Bibliogr.: p. 39.
16. Rudak, A.G. Investigation of moisture conductivity of pine wood in various structural directions / A.G. Rudak, B.V. Snopkov / *Proceedings of BSTU*. No. 2. Forestry and woodworking industry.- 2010. - No. 2. - pp. 180-183. Bibliogr.: p. 183.
17. Gorokhovskiy, A. G. Convective drying of lumber based on controlled moisture exchange / A. G. Gorokhovskiy, E. E. Shishkina, A. S. Agafonov // *Izvestia of higher educational institutions. Forest Journal*. – 2022. – № 1(385). – С. 166-172. – DOI 10.37482/0536-1036-2022-1-166-172. <https://elibrary.ru/EUPCCA>.
18. Zaripov, Sh. G. On moisture exchange processes during convective drying in batch chambers of larch lumber / Sh. G. Zaripov, V. A. Kornienko // *Coniferous boreal zones*. – 2021; 39 (1): 60-65. <https://elibrary.ru/mjhvp>.
19. Platonov A.D. Voloshin S., Snegireva S.N., Kiseleva A.V., Mozgovoy N., Safonov A.O. Moisture conductivity of apple wood // *Forestry engineering journal*. 2018; 8(32): 181-187. <https://elibrary.ru/vogopo>.
20. Platonov, A.D. Wood Quality along the Trunk Height of Birch and Aspen Growing in the Restoring Forests of Central Russia / A.D. Platonov, S.N. Snegireva, M. V. Drapalyuk et al. // *Forests*. 2022; 13 (11): 1758. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f13111758>.
21. Skuratov, N. V. Vapor permeability and moisture conductivity of thermally modified ash wood / N. V. Skuratov, D. V. Usov, I. G. Sergeev. *Krasnoyarsk*, 2022: 113-115. <https://elibrary.ru/njkcdj>.
22. Moisture conductivity of pine wood damaged by fire during atmospheric drying / A.D. Platonov, S. N. Snegireva, E. V. Kantieva [et al.] // *Promising resource-saving technologies for the development of the timber industry complex*. Voronezh, 2023: 126-129. https://doi.org/10.58168/R-STDTIC2023_126-129. <https://elibrary.ru/DEFNQF>.
23. Dynamics of ground cover in biotopes of pine forests during fragmentation caused by fires in a forest-steppe zone / V. T. Popova, A. A. Popova, A. K. Kondratieva [et al.] // *Forestry Engineering Journal*. – 2023. – V. 13, № 1(49). – P. 37-53. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2023.1/3. <https://elibrary.ru/IJJDFW>.
24. Predictive model of post-fire reforestation in the Irkutsk region / O. I. Grigorieva, O. I. Grinko, I. V. Grigoriev [et al.] // *Forestry Engineering Journal*. – 2023. – V. 13, № 1(49). – P. 85-98. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2023.1/6. – <https://elibrary.ru/TLMULF>.
25. Kotelnikov, P. Application of the Benford law in assessment of wildfire data accuracy / P. Kotelnikov, A. Martynyuk // *Forestry Engineering Journal*. – 2018. – Vol. 8. – № 1. – P. 30-36. – DOI: https://doi.org/10.12737/article_5ab0dfbb946859.24647128.
26. Snegireva, S. Variability of the hardness of pine wood damaged by strong grassroots and rampant riding fire / S. Snegireva, A. Platonov, A. Kiseleva, E. Kantieva // *Forestry Engineering Journal*. – 2022. – Vol. 11. – № 4. – P. 79-87. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/7>.
27. Tyukavina, O. Heating capability of postpyrogen pine wood / O. Tyukavina, A. Gudina // *Forestry Engineering Journal*. – 2020. – Vol. 10. – № 2. – P. 188-195. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.2/19>.

28. Kendell, A. Wildfires: Introduction, Impact, Policy, and Planning / A. Kendell, A. Galloway, C. Milligan // The Path of Flames: Understanding and Responding to Fatal Wildfires. – Boca Raton : CRC Press, 2023. – P. 3-18. – DOI: <https://doi.org/10.4324/9781003168010-2>.

29. Erni, S. Stand Age Influence on Potential Wildfire Ignition and Spread in the Boreal Forest of Northeastern Canada / S. Erni, D. Arseneault, M.A. Parisien // Ecosystems. – 2018. – Vol. 21. – № 7. – P. 1471-1486. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-018-0235-3>.

30. Bryukhanov, A. V. Wildfire Impact on the Main Tree Species of the Near-Yenisei Siberia / A. V. Bryukhanov, A. V. Panov, E.I. Ponomarev, N. V. Sidenko // Izvestiya - Atmospheric and Ocean Physics. – 2018. – Vol. 54. – № 11. – P. 1525-1533. – DOI: <https://doi.org/10.1134/S0001433818110026>.

31. Goreshev, M.A. Determination of the Coefficient of Thermal and Moisture Conductivity of Wood by the Transient Moisture Current Method / M.A. Goreshev, F.G. Sekisov, O. V. Smerdov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics.0 – 2018. – Vol. 91. – № 3. – P. 827-830. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10891-018-1805-0>.

Сведения об авторах

✉ *Платонов Алексей Дмитриевич* – доктор техн. наук, заведующий кафедрой древесиноведения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5941-6287>, e-mail: aleksey66@yandex.ru.

Снегирева Светлана Николаевна – кандидат биол. наук, доцент кафедры древесиноведения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4371-2270>, e-mail: svetka-sneg@yandex.ru.

Кантиева Екатерина Валентиновна – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой механической технологии древесины ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8352-1941>, ekantieva@mail.ru

Киселёва Александра Владимировна – канд. техн. наук, доцент кафедры древесиноведения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5960-6133>, e-mail: avk50@yandex.ru.

Information about the authors

✉ *Aleksey D. Platonov* – Dr. Sci. (Engineering), Head of the Chair of Wood Science, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva st., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5941-6287>, e-mail: aleksey66@yandex.ru.

Svetlana N. Snegireva – Cand. Sci. (Biology), Associate Professor of the Chair of Wood Science, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva st., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4371-2270>, e-mail: svetka-sneg@yandex.ru.

Ekaterina V. Kantieva – Candidate of Technical Sciences, associate professor of department of mechanical technology of wood, Voronezh State University of Forestry and Technologies name after G.F. Morozov, Timiryazeva st., 8, Voronezh, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8352-1941>, ekantieva@mail.ru

Aleksandra V. Kiseleva – Ph.D. tech. Sciences, Associate Professor of department of wood science, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva st., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5960-6133>, e-mail: avk50@yandex.ru.

✉ – Для контактов/Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/13>

УДК 630 + 58.009 : 58.02



Дневная и сезонная динамика интенсивности транспирации вереска обыкновенного (*Calluna vulgaris* (L.) Hill) на юге ареала в Зауралье

Алена А. Кочубей ✉ 79326010873@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0002-8568-9999>Ольга Е. Черепанова, botgarden.olga@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-7775-6488>Ирина В. Петрова, irina.petrova@botgard.uran.ru <https://orcid.org/0000-0001-5689-8452>

ФГБУН Ботанический сад УрО РАН, ул. 8 Марта, 202а, г. Екатеринбург, 620144, Российская Федерация

Зауралье является южной точкой ареала популяций вереска обыкновенного (*C. vulgaris*). Натурное экофизиологическое изучение интенсивности транспирации (ИТ) растений *C. vulgaris* проведено в связи с проблемой адаптации маргинальных популяций вида к засушливому климату. Исследования проводили в лесостепи Зауралья (Курганская область), где произрастает обильная популяция вереска. Дневной ход ИТ изучен на фоне комплекса зарегистрированных лимитирующих факторов среды эоклимата (скорость ветра, освещенность, динамика температуры и влажности воздуха, температура почвы) в течение одного вегетационного периода (с апреля по сентябрь 2016 г.) под пологом соснового леса и на смежной вырубке. Для изучения ИТ использовали годичные верхушечные побеги растений длиной 4 см в трехкратной повторности для каждого временного промежутка. Общий объем выборки в один день измерений составлял от 30–35 побегов. Интенсивность транспирации определяли методом быстрого взвешивания, при котором происходит учет потерянной побегом воды за определенный временной промежуток. При обработке данных использовали корреляционный анализ (коэффициент корреляции Пирсона (r)), который позволил уточнить силу и направление взаимодействия для двух непрерывных метрических переменных. Выявлены различия в суточном изменении ИТ у растений, произрастающих под пологом леса и на открытых участках. В условиях обычной в регионе длительной атмосферной и почвенной засухи, в 2016 г. отмечено резкое снижение ИТ вереска, начиная с 10 ч утра в течение всего периода вегетации, за исключением апреля, когда дефицит влаги в почве и тканях вереска был еще минимален. В мае максимальные значения ИТ на вырубке отмечены к 14 часам дня ($8,5 \text{ мг/ч} \times 10^{-4}$), тогда как под пологом древостоя пиковые значения ИТ начинаются с 10-ти часов утра ($12,7 \text{ мг/ч} \times 10^{-4}$). Дневная летняя транспирация у вереска обыкновенного (*C. vulgaris*) отличается еще меньшей интенсивностью, чем весенняя ($(3-5 \text{ мг/г} \cdot \text{ч} \times 10^{-4})$). Выявлено, что определяющую роль на ИТ в различных типах леса играют параметры метеофакторов. На открытых участках вырубок определяющим фактором является ФАР ($0,81, p < 0,05$) и, в меньшей степени, температура атмосферного воздуха ($0,69, p < 0,05$), а под пологом древостоя – только показатели ФАР ($0,96, p < 0,05$). Снижение ИТ и, соответственно, фотосинтеза приводит к уменьшению жизнеспособности популяций и невызреванию семян, что является экофизиологическим фактором отсутствия вереска к югу от г. Кургана.

Ключевые слова: вереск обыкновенный, *Calluna vulgaris*, транспирация, Зауралье, динамика транспирации.

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания Ботанического сада УрО РАН (№ 1022040100468-6-1.6.11;1.6.20).

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Кочубей А. А. Дневная и сезонная динамика интенсивности транспирации вереска обыкновенного (*Calluna vulgaris* (L.) Hill) на юге ареала в Зауралье / А. А. Кочубей, О. В. Черепанова, И. В. Петрова // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 4 (52). – Ч. 1. – С. 209–222. – Библиогр.: с. 219–222 (22 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/13>.

Поступила 19.02.2023. *Пересмотрена* 05.09.2023. *Принята* 27.11.2023. *Опубликована онлайн* 29.12.2023.

Article

Daily and season transpiration intensive of *Calluna vulgaris* (L.) Hill in the trans-Ural south area

Alena A. Kochubey, ✉ 79326010873@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0002-8568-9999>

Olga E. Cherepanova, botgarden.olga@gmail.com  <https://orcid.org/0000-0001-7775-6488>

Irina V. Petrova, irina.petrova@botgard.uran.ru  <https://orcid.org/0000-0001-5689-8452>

Russian Academy of Sciences, Ural Branch: Institute Botanic Garden, March 8 st., 202a, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation

Abstract

The Trans-Ural region is the southern point of the common heather (*C. vulgaris*) range. Field ecophysiological study of *C. vulgaris* plants transpiration intensity (IT) was carried out in connection with the problem of marginal populations adaptation to arid climate. The research was carried out in the forest-steppe of the Trans-Ural region (Kurgan region), where an abundant population of heather grows. The daily variation of IT was studied taking into account a set of recorded ecoclimate limiting factors (wind speed, illumination, dynamics of air temperature and humidity, soil temperature) during one growing season (from April to September 2016) under the canopy of a pine forest and in the adjacent clearing. To study IT, annual apical shoots of plants 4 cm long were used in triplicate for each time period. The total sample size on one day of measurements ranged from 30–35 shoots. The transpiration rate was determined by the rapid weighing method, which takes into account the water lost by the shoot over a certain time period. When processing the data, we used correlation analysis (Pearson's correlation coefficient r), which made it possible to clarify the strength and direction of two continuous (metric) variables interaction. Differences in IT daily changes were revealed in plants growing under the forest canopy and in the open areas. Under conditions of long-term atmospheric and soil drought, which is common for the region, in 2016 a sharp decrease in heather water content was observed, starting from 10 a.m. throughout the entire growing season, with the exception of April, when the moisture deficit in the soil and heather tissues was still minimal. In May, maximum IT values in the clearing were noted at 14:00 ($8.5 \text{ mg/h} \times 10^{-4}$) whereas under the canopy of the tree stand, peak IT values begin at 10 a.m. ($12.7 \text{ mg/h} \times 10^{-4}$). Daytime summer transpiration in common heather (*C. vulgaris*) is even less intense than spring transpiration ($3\text{--}5 \text{ mg/h} \times 10^{-4}$). It was revealed that meteorological factors play a decisive role in IT in various types of forest. In open felled areas, the determining factor is PAR (0.81, $p < 0.05$) and, to a lesser extent, atmospheric temperature (0.69, $p < 0.05$), and under the canopy - only PAR (0.96, $p < 0.05$). A decrease in IT and, accordingly, photosynthesis leads to a decrease in the population's vitality and non-ripening of seeds, which is an ecophysiological factor of the heather absence south of Kurgan city.

Keywords: *Calluna vulgaris*, transpiration, Trans-Urals, transpiration dynamics.

Funding: The work was carried out within the framework of a state assignment the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (No. 1022040100468-6-1.6.11; 1.6.20).

Acknowledgments: the authors thank the reviewers and editors for their contribution to the peer review of this work.

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

For citation: Kochubey A.A., Cherepanova O.E., Petrova I.V. (2023). Daily and season transpiration intensive of *Calluna vulgaris* (L.) Hill in the Trans-Ural south area. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 4 (52), part 1, pp. 209-222 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/13>.

Received 19.02.2023. **Revised** 05.09.2023. **Accepted** 27.11.2023. **Published online** 29.12.2023

Введение

Транспирация – важнейший физиологический процесс у наземных растений, играющий ведущую роль в обеспечении энергетического и гидрологического баланса [1, 2]. Изучение механизмов транспирации растений и их взаимосвязи с особенностями морфолого-анатомического строения листа имеет первостепенное значение для понимания экологической устойчивости и адаптации к климатическим факторам [3-5]. Изменение климатических условий регистрируются для всей территории России, в том числе и для климата на Южном Урале и в Зауралье. Наиболее существенные изменения в температурном режиме и режиме осадконакопления произошли здесь в зимние месяцы. Климат стал более теплым, что привело к вертикальному и горизонтальному сдвигу растительности [6]. В связи с этим, огромный интерес представляет возможный адаптационный потенциал растений. Факторы, оказывающие влияние на продуктивность растений, такие, как повышение температуры воздуха, изменение гидрологического режима, в условиях глобальной климатической трансформации могут являться вероятной причиной перераспределения видов в экосистемах [7, 8]. По мере потепления, климат Зауралья в весенне-летний период становится сопоставим с климатом Северного Казахстана (рисунок 1). Это выражается в засушливой ранней весне, высокой ветровой нагрузке, смещении и расширении ареала южных видов животного и растительного мира, замещении хвойных пород деревьев лиственными. При аридизации климата динамика интенсивности транспирации растений становится основным лимитирующим фактором роста, развития и продуктивности растений [9-11].

Пограничное положение территории Зауралья между бореальной и степной зонами обуславливает значительное участие во флоре видов

как бореального, так и степного комплексов. Основные леса Зауралья занимают наиболее дренируемые местообитания, приуроченные к песчаным наносам неогена, что составляет около 30% среди покрытой лесом площади. Одним из характерных видов в составе травяно-кустарничкового яруса таких сосновых лесов является вереск обыкновенный (*C. vulgaris*). Юго-восточным пределом ареала распространения вереска обыкновенного (*C. vulgaris*), несмотря на выраженную ксерофитность данного вида, является северная лесостепь Зауралья. В борových массивах этот вечнозеленый вегетативно-подвижный кустарничек встречается широко, может произрастать под пологом леса, на старых гарях и вырубках [12, 13].

В настоящее время ареал, морфология, аутоэкология и физиология особой вереска обыкновенного (*C. vulgaris*) всесторонне изучены [14, 15]. Согласно флористическим описаниям Н.И. Науменко (2008) и П.Л. Горчаковского (1962), южнее Зауралья вид встречается в отрыве от основного ареала только небольшими группами в борах Казахского мелкосопочника [9, 10]. В связи с проблемой адаптации маргинальных популяций вида к засушливому климату Зауралья были изучены в полевых условиях некоторые особенности одного из ведущих признаков водного режима растений – транспирации. Основная задача исследования заключалась в изучении в полевых условиях интенсивности транспирации вереска, произрастающего в разных условиях на территории Южного Зауралья. Кроме того, дополнительной задачей исследования стали оценка и сравнение климатических параметров (среднегодовая атмосферная температура, сумма годовых температур и др.) основного региона изучения (Курганская область) и граничащего с ним Северного Казахстана, для изучения их влияния друг на друга.

Представленная работа обобщает результаты натурального эксперимента, в рамках которого проведено сравнение интенсивности транспирации вереска, произрастающего на открытых участках и под пологом сосновых лесов.

Материалы и методы

Объект и предмет исследования

Исследования по изучению дневной и сезонной интенсивности транспирации проводились в 2016 году в лесостепи Зауралья (Курганская область, окрестности пгт. Красный Октябрь). Модельными участками произрастания вереска обыкновенного (*C. vulgaris*) были выбраны контрастные по режиму освещенности экотопы – открытая инсолируе-

мая вырубка (55°65'83"N, 64°79'52"E, 143 м над уровнем моря) и полог смежного сосняка чернично-вересково-зеленомошного (55°65'85.5"N, 64°79'39.1"E, 143 м над уровнем моря).

Полевые эксперименты по определению дневного и сезонного хода интенсивности транспирации листьев вереска обыкновенного (*C. vulgaris*) проводились в течение периода вегетации – с конца апреля по начало сентября 2016 г. – на терминальных фотосинтезирующих побегах длиной 4 см. Побег вереска часто покрыт мелкими черепично расположенными листьями, размер которых не превышает 1,3 мм, что не позволяет исследовать каждый лист в отдельности.

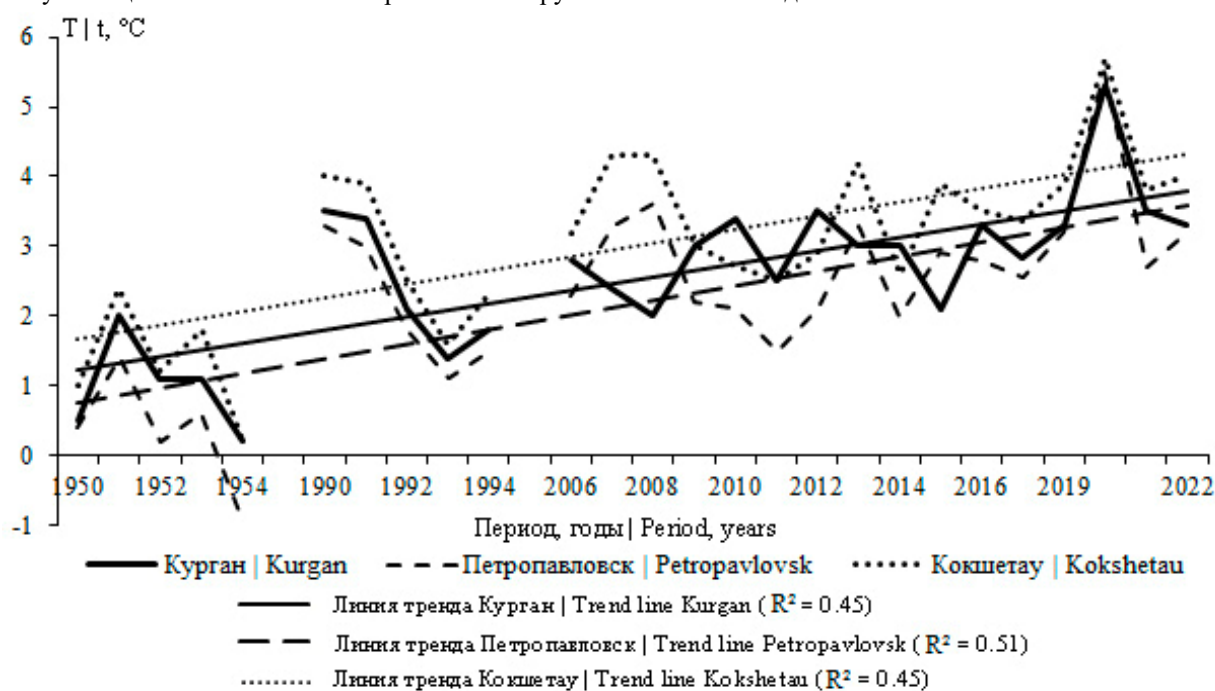


Рисунок 1. Динамика среднегодовых температур в Зауралье (Курган) и Северном Казахстане (Петропавловск, Кокшетау).

Figure 1. An average annual temperatures dynamics in the Trans-Urals (Kurgan) and Northern Kazakhstan (Petropavlovsk, Kokshetau).

Источник: сайт «Погода и климат» (<http://www.pogodaiklimat.ru>)

Source: Website of Pogodaiklimat.ru

Сбор данных

Интенсивность транспирации определяли методом быстрого взвешивания. В основе метода лежит учет количества воды, потерянной листом за короткий промежуток времени (1-5 мин в зависимости от условий опыта) в результате транспирации. При этом изменение массы листа следует учитывать до

начала его завядания [16]. Простота метода позволяет изучать адаптационные механизмы растений в полевых условиях без дорогостоящего оборудования. По данной методике измерения проводятся с помощью электронных весов до тех пор, пока вес листа не стабилизируется, что свидетельствует о закрытии устьиц и начале процесса завядания. Побеги

с листьями вереска обыкновенного (*C. vulgaris*) срезами с открытой освещенной стороны каждого растения, взвешивали на электронных лабораторных весах (Digital jewelry scale, Китай, 50g/0,001 g) и экспонировали в том же месте. Измерения проводили в трехкратной повторности, время экспозиции составляло 5 мин.

Наблюдения ИТ повторяли через каждые 2 часа с 10 до 18 часов дня. Экспериментальные данные показали, что до 8 часов утра, а также после 18 часов вечера, транспирация листьев идет слабо, что позволило исключить эти временные интервалы. Интенсивность транспирации определяли на фоне синхронной регистрации ФАР (фотосинтетически активной радиации, лк) люксметром «ТКА-ПКМ» (31) (ООО НТП «ТКА», Россия), температуры мини-регистратором Data Loggers (Термохрон, Dallas Semiconductor, США), относительной влажности воздуха термогигрометром AR-807 (Smart Sensor, Китай) и скорости ветра анемометром Testo 410-2 (Testo SE & Co, Германия). Определения интенсивности транспирации проводили в солнечные и безоблачные дни, выпадение июня произошло вследствие дождливой погоды в предполагаемый день замера.

Расчет интенсивности транспирации (мг воды/г*ч) проводился по формуле $I = (m_1 - m_2) / m_0 * t$, где m_1 – начальный вес побега (мг), m_2 – масса побега через 5 минут (мг), m_0 – абсолютно сухой вес побега (г), t – продолжительность транспирации (ч). В лабораторных условиях определяли абсолютно сухой вес и процент облиственности каждого образца [16, 17].

Оценку климатических параметров (среднегодовая атмосферная температура, сумма отрицательных и положительных годовых температур, максимумы и минимумы средних ежемесячных температур) проводили с использованием открытых материалов метеорологических баз данных (<http://www.pogodaiklimat.ru>) за 70-летний период с 1950 по 2022 год с трех метеорологических станции: Курган (Россия), Петропавловск и Кокшетау (Казахстан).

Анализ данных

Статистическая обработка данных проведена с использованием пакета программ Excel, (Microsoft, США), Statistica 10.0 portable (StatSoft, Russia). Для расчета корреляции использовали коэффициент корреляции Пирсона (r), который позволяет уточнить силу и направление взаимодействия для двух непрерывных (метрических переменных), измеренных на одной и той же выборке. Нулевая гипотеза: интенсивность транспирации не зависит от влажности и уровня освещенности.

В целях визуализации данных были использованы график «ящик с усами», позволяющий оценить форму распределения, среднее, медиану, квартили и вероятные выбросы для набора данных. Методом однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) оценили различия средних значений между группами (Tukey test). Визуализацию корреляционной матрицы провели с использованием цветовой шкалы, реализованной в пакете программ Excel.

Результаты

Основные результаты исследований интенсивности транспирации вереска обыкновенного (*C. vulgaris*), представленные в табл. 1 и на рис. 2, позволяют сделать следующие выводы. Следствием засухи 2016 г. был крайний дефицит влаги в песчаных почвах соснового леса. Почвенная объемная влажность в июле 2016 г. на глубине 5–10 см понижалась до уровня 3–5% на вырубке и до 2–3% в лесу (близкого к влажности завядания растений) под влиянием корневой конкуренции древостоя [18, 19]. В дни измерений скорость ветра не превышала 3 м/с, что характеризуется как «тихий» или «легкий». Влажность воздуха в районе цветоносов вереска обыкновенного (*C. vulgaris*) на открытой вырубке только по утрам превышала таковую под покровом леса.

Относительно высокая ИТ вереска обыкновенного (*C. vulgaris*), составляющая $9\text{--}15 \text{ мг/г*ч} \times 10^{-4}$, довольно тесно ($r=0,81$, $p<0,05$, табл. 2) коррелирующая с ФАР в суточном ходе, наблюдалась на открытом месте с 10 до 13 ч. В несколько меньшей мере ($5\text{--}14 \text{ мг/г*ч} \times 10^{-4}$), но дольше в течение дня (до 16 ч) высокая ИТ зафиксирована под пологом древостоя лишь в апреле, при достаточной влагообеспеченности почвы (10–12%) в его ризосфере.

Таблица 1

Параметры метеофакторов и интенсивности транспирации вереска обыкновенного (*C. vulgaris*) в экотопах сплошной вырубке и под пологом леса в северной лесостепи Зауралья

Table 1

Meteorological factors parameters and heather transpiration intensity in Clearcut Ecotopes and Under Forest Canopy in the Northern Forest-Steppe of the Trans-Urals

Время измерений, час Measurement time, hour	Вырубка Deforestation							Полог леса Forest canopy						
	ИТ, (мг/г*ч)*10 ⁻⁴ ТТ, (мг/г*ч)*10 ⁻⁴	Весов. Доля листьев, % Weight fraction of leaves, %	Скорость ветра, м/с Wind speed, m/s	ФАР, лк PAR	Влажность возд., % Air humidity, %	Температура Temperature, °C*		ИТ, (мг/г*ч)*10 ⁻⁴ ТТ, (мг/г*ч)*10 ⁻⁴	Весов. доля листьев, % Weight fraction of leaves, %	Скорость ветра, м/с Wind speed, m/s	ФАР, клк PAR	Влажность возд., % Air humidity, %	Температура Temperature, °C*	
						Почва Soil	Воздух Air						Почва Soil	Воздух Air
Апрель April														
10	9.4 ±4.2	70.03 ±6.22	0.30	92.0	–	3.5 ±0.1	21.5 ±0.5	3.9 ±1.5	67.26 ±1.04	0.2 4	13. 1	–	4.0 ±0.3	12.0 ±1.1
12	15.1 ±6.9	67.74 ±8.44	0.60	99.0	–	3.5 ±0.6	27.5 ±0.6	14.3 ±7.3	69.16 ±9.25	0.1 0	60. 0	–	4.0 ±0.6	16.0 ±0.9
14	6.0 ±1.7	50.65 ±1.03	0.55	90.0	–	4.0 ±0.9	26.5 ±0.5	10.5 ±3.9	65.65 ±4.31	0.1 6	32. 0	–	4.5 ±0.7	17.0 ±0.5
16	5.5 ±2.6	61.36 ±18.3	0.27	13.7	–	4.5 ±0.8	13.5 ±0.3	5.1 ±0.5	69.66 ±3.73	0.2 0	5.1 –	–	5.0 ±0.5	14.5 ±0.6
18	4.1 ±0.7	64.40 ±7.55	0.10	5.0	–	4.5 ±0.5	10.0 ±0.4	2.4 ±0.8	67.11 ±1.25	0.0 0	1.7 –	–	5.0 ±0.3	12.0 ±0.3
Май May														
08	7.6 ±1.3	70.81 ±4.01	0	75.3	78	10.0 ±1.0	19.0 ±1.3	12.1 ±3.4	69.91 ±11.8 5	0	35. 6	75	9.0 ±0.9	17.5 ±0.6
10	7.0 ±3.3	71.41 ±2.91	0.39	95.3	70	10.0 ±1.0	27.0 ±1.0	12.7 ±5.1	67.97 ±21.8 8	0	21. 5	79	9.0 ±1.0	21.5 ±0.9
12	7.2 ±2.6	76.35 ±1.22	0.66	100	67	10.5 ±0.8	32.0 ±0.9	6.1 ±2.8	69.75 ±4.25	0.3 5	52. 3	63	9.5 ±1.0	25.5 ±1.0
14	8.5 ±2.5	74.96 ±10.1	0.01	55.8	47	11.0 ±0.7	32.0 ±0.6	6.2 ±3.2	71.70 ±1.20	0.1 8	28. 0	57	10.0 ±0.7	25.5 ±0.8
16	5.2 ±3.0	80.57 ±8.50	0.49	29.3	58	12.0 ±0.5	29.0 ±0.3	4.1 ±1.9	66.20 ±7.07	0	5.7	64	10.0 ±0.6	26.0 ±0.5
18	2.0 ±1.0	80.72 ±4.62	0.34	9.0	79	12.0 ±0.3	21.5 ±0.5	3.4 ±1.7	77.87 ±5.36	0	1.8	70	10.5 ±0.3	23.0 ±0.4
Июль July														
10	4.8 ±1.2	64.28 ±3.51	0	70.3	57	17.5 ±0.9	26.0 ±1.2	11.1 ±5.8	64.0 ±3.72	0	7.8	69	14.5 ±0.9	21.5 ±0.7
12	7.9 ±4.6	67.17 ±4.28	2.9	36.5	64	18.5 ±0.9	26.0 ±1.1	7.0 ±0.6	76.62 ±4.31	0	4.3	64	14.8 ±0.9	22.0 ±0.6

14	8.8 ±2.9	67.44 ±5.12	1.9	28.1	78	19.0 ±0.7	26.0 ±0.9	6.9 ±1.7	69.38 ±9.5	0	2.9	74	15.0 ±0.8	22.0 ±0.7
16	5.5 ±1.9	72.57 ±8.54	0	39.6	81	19.5 ±0.5	23.0 ±0.4	5.8 ±2.4	78.40 ±6.7	0	1.8	86	15.0 ±0.5	21.5 ±0.5
18	4.5 ±0.4	65.61 ±3.47	0	10.2	76	19.0 ±0.5	22.0 ±0.3	3.9 ±1.8	67.63 ±4.5	0	1.9	81	15.0 ±0.5	20.5 ±0.3
Сентябрь September														
10	0.9 ±0.5	71.2 ±7.26	0	20.6	82	10.0 ±1.2	27.0 ±0.9	3.0 ±1.2	63.53 ±5.99	0	3.6	78	9.0 ±1.0	21.5 ±0.8
12	6.1 ±3.7	60.14 ±5.93	0.41	49.4	58	10.5 ±0.9	32.0 ±0.7	3.6 ±0.7	64.23 ±3.05	0.1	12. 7	62	9.5 ±0.9	25.5 ±0.7
14	1.9 ±0.5	56.47 ±13.0	0	18.6	76	11.0 ±0.6	32.0 ±0.5	4.1 ±2.5	67.71 ±4.21	0	4.5	77	10.0 ±0.5	25.5 ±0.4
16	3.6 ±1.6	55.17 ±10.0	0	10.1	70	12.0 ±0.7	29.0 ±0.5	1.8 ±0.6	61.73 ±4.66	0	1.0	72	10.0 ±0.5	26.0 ±0.3
18	1.3 ±0.6	68.55 ±2.93	0	3.4	85	12.0 ±0.5	21.5 ±0.3	4.9 ±1.3	55.69 ±0.46	0	0.5	72	10.5 ±0.5	23.0 ±0.3

Примечание: ИТ – интенсивность транспирации, (мг/г*ч)*10⁻⁴, * – температура почвы на глубине 10 см, температура воздуха – на уровне цветоносов вереска, М±m (среднее±СКО).

Note: TI – transpiration intensity, (mg/g*h)*10⁻⁴, * – soil temperature at 10 cm depth, air temperature – at heather peduncles level, M±m (average value±Standard deviation).

Источник: собственные вычисления авторов.

Source: own calculations.

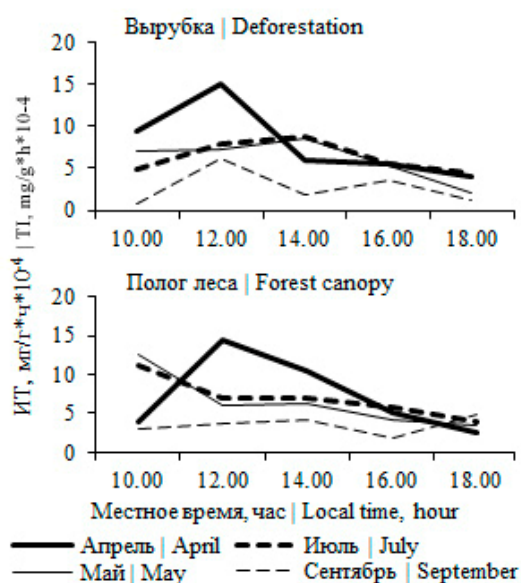


Рисунок 2. Динамика интенсивности транспирации вереска обыкновенного (*C. vulgaris*) в течение светового дня в условиях вырубки и под пологом леса за вегетационный период 2016 г. в северной лесостепи Зауралья

Figure 2. Transpiration dynamics intensity *C. vulgaris* during daylight hours at deforestation and under the

forest canopy for the growing season 2016 in the northern forest-steppe of the Trans-Urals.

Источник: собственные вычисления авторов.

Source: own calculations.

Начиная с мая, на фоне интенсивной длительной засухи и крайне высокой температуры воздуха в дневные часы (в 12–14 ч – 32 °С) влажность транспирирующих листьев на побегах, по сравнению с апрелем, уменьшилась на 33%, а в июле на 48%. В связи с этим ИТ к 12 ч дня в мае и уже с 10 ч утра, а в июле только на открытом месте из-за водного дефицита в листьях уже с утра до 12 ч была минимальной (всего 7–8 мг/г*ч×10⁻⁴) и еще более падала к вечеру (до 2–4 мг/г*ч×10⁻⁴). Вследствие дефицита влаги в тканях, усугубляемой корневой конкуренцией древостоя (см. табл. 1), еще меньшей интенсивностью, даже в утренние часы, отличалась л-тняя транспирация у вереска обыкновенного (*C. vulgaris*) под пологом леса (3–5 мг/г*ч×10⁻⁴).

Таблица 2

Корреляции интенсивности транспирации с ФАР и температурой воздуха в апреле ($p < 0,05$)

Table 2

Correlations of transpiration intensity in April ($p < 0.05$)

	ФАР PHAR	T, °C	Вырубка Deforestation	Полог леса Forest canopy
ФАР PHAR	1	0,34	0,81	0,96
T, °C	0,34	1	0,69	0,60
Вырубка Deforestation	0,81	0,69	1	0,11
Полог леса Forest canopy	0,96	0,60	0,11	1

Примечание: ФАР – фотосинтетически активная радиация, клк; T, °C – температура воздуха, °C
 Note: PAR – Photosynthetically available radiation, clc; T, °C – air temperature, °C.

Источник: собственные вычисления авторов
 Source: own calculations.

При сравнении параметров ИТ (Tukey test, $p < 0,05$) в различные месяцы внутри одной группы (под пологом леса или же на вырубке) в ходе анализа ANOVA, выявили, что транспирация достоверно отличается только в апреле и августе под пологом леса. Остальные точки демонстрируют недостоверные различия, что нашло свое отражение на графике (рис. 3). ИТ постепенно изменяется в сторону снижения к августу как под пологом леса, так и на вырубке.

Влажность листьев на терминальных побегах вереска с 79.7% в апреле 2016 г. (сразу после схода снега) опустилась до 52.2% в мае и до 46.4% в июле, хотя в сентябре вновь возросла до 53.5% (табл. 3). Активная жизнедеятельность растений возможна только при высокой обводненности их тканей. Обводненность вереска на открытом месте в течение сезона была выше, чем под пологом древостоя.

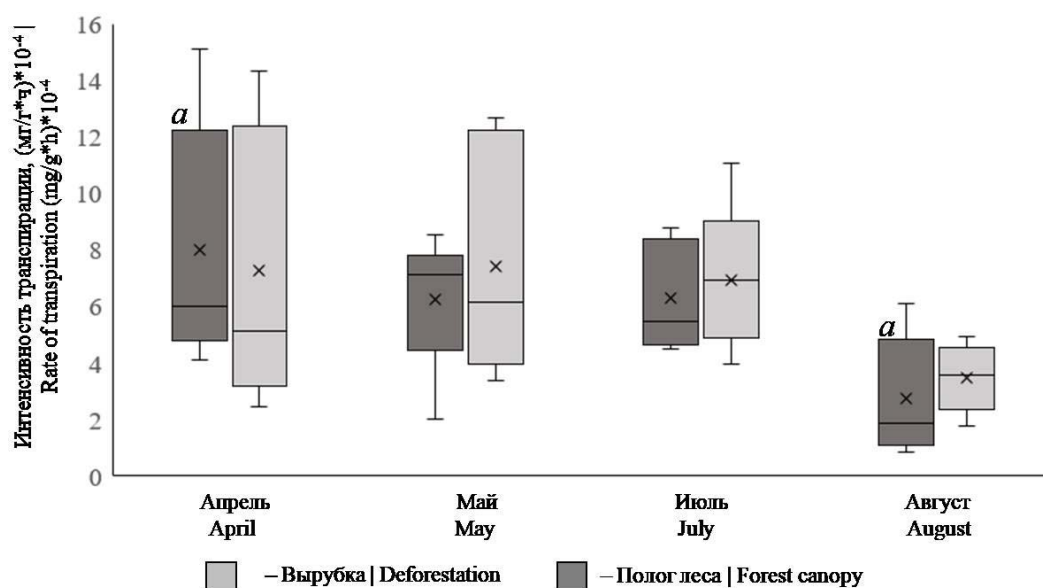


Рисунок 3. Визуализация среднемесячных значений ИТ, измеренных в течение вегетационного периода 2016 г. на вырубке и под пологом леса в северной лесостепи Зауралья, где а – статистически значимо различающиеся группы (Tukey test, $p < 0,05$).

Figure 3. Visualization of monthly average IT values measured during the 2016 growing season at deforestation and under the forest canopy in the northern forest-steppe of the Trans-Urals, where a are statistically significantly different groups (Tukey test, $p < 0,05$).

Источник: собственные вычисления авторов.
 Source: own calculations

Таблица 3
Сезонная обводненность листьев вереска обыкновенного (*C. vulgaris*) в подзоне северной лесостепи Зауралья

Table 3
Leaves seasonal watering *Calluna vulgaris* in the subzone of the Trans-Urals northern forest-steppe

Месяц Month	Вырубка Deforestation, %	Полог леса Forest canopy, %
Апрель April	69.4±5.4	79.7±5.2
Май May	61.1±2.6	52.2±0.6
Июль July	63.7±13.7	46.4±2.3
Сентябрь September	67.2±4.8	53.5±5.5

Примечание: M±m (среднее±СКО).

Источник: собственные вычисления авторов

Note: M±m (average value±Standard deviation).

Source: own calculations

Это можно объяснить формированием на открытом месте больших куртин *C. vulgaris*, которые поддерживали микроклимат, и высок-й долей участия растений лугового сообщества, порой превышающие *C. vulgaris* высотой. Кроме того, на открытой вырубке отметили выпадение большего количества росы, чем под пологом леса. Под пологом древостоя куртины *C. vulgaris* более разрозненные, выше уровня основной массы растений живого напочвенного покрова/зеленых мхов, в условиях хронического дефицита почвенной влаги и, как следствие, имели меньшую обводненность листьев. Изучение механизмов транспирации растений и их взаимосвязи с особенностями морфо-анатомического строения лист, имеет большое значение для понимания экологической устойчивости и адаптации к климатическим изменениям. Исследования морфо-анатомических параметров листьев популяций вереска в Зауралье выявили тренд некоторого достоверного увеличения их ксероморфизма – толщины кутикулы и клеток эпидермы, снижения плотности устьиц и трихом, а также их переориентацию

на обратную сторону листовой пластинки [14], что является адаптацией к более сухому атмосферному воздуху

Обсуждение

Динамика среднегодовой температуры в трех точках лесостепной подзоны Курган (Россия), Петропавловск и Кокшетау (Казахстан) свидетельствует об увеличении значений среднегодовых температур за последние 70 лет, а также сближении погодных условий Кургана и Петропавловска (см. рис. 1). Повышение среднегодовой температуры в 20-х годах XXI по сравнению с 50-ми годами XX на 2,9 °C в Кургане (с 0,98°C до 3,85 °C) и на 3–3,3 °C (с 0,34°C до 3,65°C в Петропавловске, с 1,32°C до 4,35°C в Кокшетау) происходит вследствие повышения температуры воздуха в зимний период при сохранении зональных особенностей, а также в результате увеличения суммы атмосферных температур за весенне-летний период (рис. 4). Динамика сумм температур атмосферного воздуха за вегетационный период показывает, что происходит выравнивание климатических условий Зауралья (Курган) и Северного Казахстана (Петропавловск) в лесостепной зоне.

Среднегодовая температура воздуха в Зауралье в 2016 (3,0 °C) равна среднему значению за предыдущий десятилетний период за 2006-2016 гг. (3,04 ± 0,65 °C). Максимум среднегодовой температуры пришелся на 2008 год, а минимум – 2011 год, при этом сумма среднемесячных температур за вегетационный период с апреля по сентябрь оказалась сходной и составила 85,2 °C. В 2016 году сумма среднемесячных температур за вегетационный период приблизилась к самому жаркому за 10-летний период наблюдений 2012 году – 92,7°C и 97,9°C, соответственно (рис. 5).

Наблюдения за динамикой среднегодовых температур воздуха указывают на скачкообразное увеличение значений, что, вероятно, может стать причиной остепнения лесостепной зоны Зауралья и трансформации состава растительных сообществ. Достаточно жаркий вегетационный период 2016 г. позволяет оценить устойчивость растений вереска к засушливому климату.

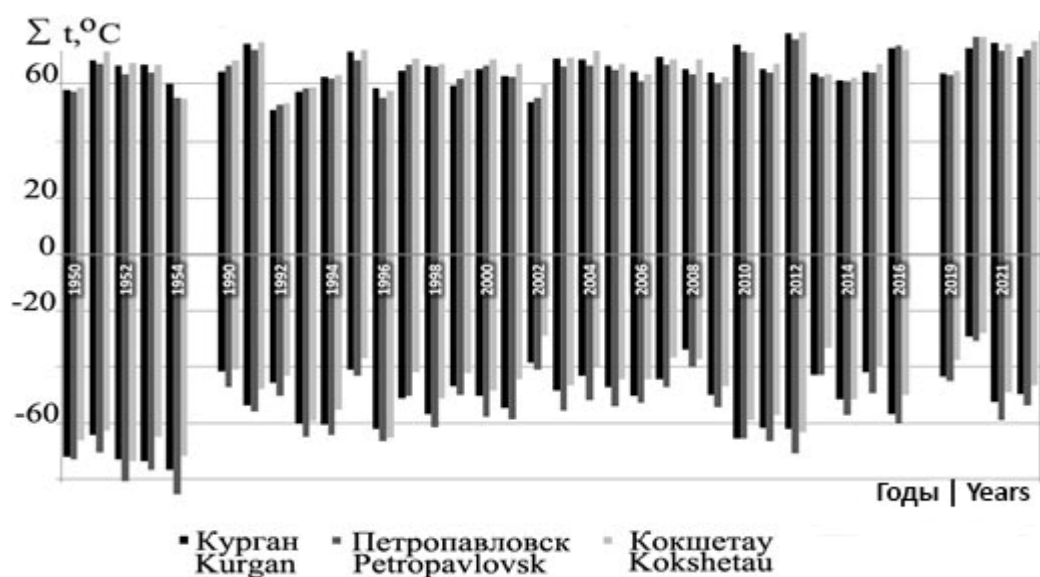


Рисунок 4. Динамика летних и зимних температур (Σt , °C) в Зауралье (Курган) и Северном Казахстане (Петропавловск, Кокшетау).

Figure 4. Summer and winter temperatures dynamics (Σt , °C) in the Trans-Urals (Kurgan) and Northern Kazakhstan (Petropavlovsk, Kokshetau).

Источник: сайт «Погода и климат» (<http://www.pogodaiklimat.ru>)

Source: Website of Pogodaiklimat .ru.

При закрытых устьицах во время засухи резко сокращаются не только процессы транспирации, но и фотосинтеза [20], что приводит к угнетению ростовых процессов. Вероятно, именно это угнетение и является главным фактором, детерминирующим расселение вереска к югу от предлесостепи в Западной Сибири [12, 13]. Кроме того, исследование уровня семеношения *C. vulgaris* в борах северной лесостепи, показало, что семенная продуктивность популяций вереска в данном регионе снижается, по сравнению с европейской частью сплошного ареала данного вида [21]. Было исследовано, что под пологом сомкнутого древостоя сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в северной лесостепи средняя урожайность семян вереска в несколько раз ниже ($1673,14 \pm 561,4$ шт.), чем на открытой вырубке ($17067,3 \pm 6150,7$ шт.). В работе О.Е. Черепановой (2023) [14], основным фактором, оказывающим определяющее влияние на формирование числа коробочек под пологом леса, указывается снижение общей освещенности.

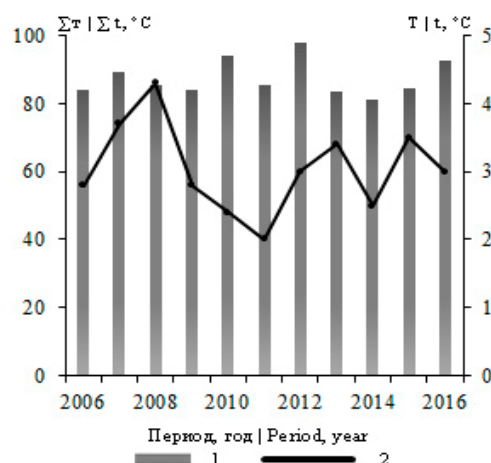


Рисунок 5. Десятилетняя динамика изменения среднегодовой температуры в подзоне северной лесостепи Зауралья

Figure 5. The average annual temperature ten-year dynamics changes in the subzone of the northern forest-steppe of the Trans-Urals

Примечание: 1 – Сумма средних температур за вегетационный период, °C, 2 – Среднегодовая температура, °C.

Note: 1 – Sum of the average temperatures during the growing season, °C, 2 – Average annual temperature, °C.

Источник: сайт «Погодные сервисы» [18]

Source: Website pogoda-service.ru

В 2022 г. было проведено маршрутное исследование территорий лесостепного Зауралья с целью выявления новых локалитетов, кроме того, как и в 2016 г., проведена оценка состояния популяций. Отмечено, что в степных участках открытой вырубке экземпляры вереска сохранились в удовлетворительном состоянии только под пологом соснового подроста. Повышение среднегодовой температуры только с 2016 по 2022 гг. примерно на 1°C привело к гибели зарослей вереска на открытых местообитаниях, где важнейшим лимитирующим фактором оказывается солнечная инсоляция, что свидетельствует о конкурентной неустойчивости вереска в составе остепненных фитоценозов. Под пологом сосновых лесов, где видовое разнообразие значительно ниже, популяции вереска способны выживать, адаптируясь к высокой степени затенения.

Известно, что постепенное повышение температуры воздуха может привести к снижению свободной воды в тканях листа, необходимой для транспирации растений и успешного протекания процесса фотосинтеза [21, 22]. При дальнейшей аридизации климата северной лесостепи Зауралья дефицит свободной воды в тканях растения вереска может привести к снижению скорости фотосинтеза, что негативно отразится на всей популяции в целом и может привести к выпадению вереска из состава лесных сообществ. Сближение климата Зауралья и Северного Казахстана, повышение среднегодовых температур в регионе угрожает смещением границы распространения вереска.

Заключение

Достоверные значимые среднемесячные различия ИТ в течение вегетационного периода 2016 г. ($p < 0,05$, см. рис. 3) наблюдали в апреле и в августе под пологом соснового древостоя. Остальные месяцы исследований статистически значимых различий не показали.

В целом, в условиях засушливого климата-в северной лесостепи Зауралья на юге ареала вереска в экстремальном вегетационном периоде 2016 г., лишь в самом его начале (в апреле), когда почвенный субстрат еще достаточно обеспечен талой влагой (особенно под пологом леса) наблюдается нормальный суточный ход ИТ с максимумом в полуденные часы и его корреляция с ФАР и температурой воздуха. В обычные здесь периоды длительных летних засух (под пологом леса усугубляемых корневой конкуренцией древостоя) [19] ИТ вереска (и, следовательно, синхронно с ней и процесс фотосинтеза) днем и вечером снижаются в несколько раз. В центральной части ареала вереск произрастает на открытых участках, но в соседстве с зелеными мхами в понижении рельефа. С продвижением в глубь континента, частота встречаемости вереска резко снижается [14]. Предполагаем, что определяющие значение здесь играет общее понижение атмосферной влажности и повышение температуры в дневные часы.

Список литературы

1. Shi L., Liu H., Wang L., Peng R., He H., Liang B., Cao J. Transitional responses of tree growth to climate warming at the southernmost margin of high latitudinal permafrost distribution, *Science of The Total Environment*, 2023, 168503. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168503>.
2. Grau-Andrés R., Matt Davies G., Waldron S., Scott E. M., Gray A. Increased fire severity alters initial vegetation regeneration across Calluna-dominated ecosystems, *Journal of Environmental Management*. 2019; 231: 1004-1011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.113>.
3. Log T. Modeling drying of degenerated Calluna vulgaris for wildfire and prescribed burning risk assessment. *Forests*. 2020; 11: 759-765. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11070759>.
4. Schellenberg J., Bergmeier E. The Calluna life cycle concept revisited: implications for heathland management. *BiodiversConserv*. 2022; 31: 119–141. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10531-021-02325-1>.
5. Gen S., Stanley M.J. Whole leaf comparative study of stomatal conductance models. *Frontiers in Plant Science*. 2022; 13. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.766975>

6. Hagedorn F., Dawes M.A., Bubnov M.O., Devi N.M., Grigoriev A.A., Mazepa V.S., Shiyatov S.G., Moiseev P.A., Nagimov Z.Y. Latitudinal decline in stand biomass and productivity at the elevational treeline in the Ural mountains despite a common thermal growth limit. *Journal of Biogeography*. 2020; 47(8): 1827-1842. DOI: <https://doi.org/10.1111/jbi.13867>.
7. Potter C., Changes in vegetation cover of the arctic national wildlife refuge estimated from modis greenness trends. *Earth Interact*. 2019; 23: 1–18. DOI: <https://doi.org/10.1175/EI-D-18-0018.1>.
8. Napier J.D, De Lafontaine G, Hu F.S. Exploring genomic variation associated with drought stress in *Picea mariana* populations. *Ecol Evol*. 2020; 10(17): 9271-9282. DOI: <https://doi.org/10.1002/ece3.6614>
9. Байшоланов С.С., Павлова В.Н., Жакиева А.Р., Чернов Д.А., Габбасова М.С. Агроклиматические ресурсы Северного Казахстана. Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018; 1 (367): 168-184. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35138146>
10. Eynaud F., Verdin F., Mary Y., Beaudouin C., López-Romero E., Penaud A., Colin Ch., Culioli C. Holocene climate dynamics on the European scale: Insights from a coastal archaeological record from the temperate Bay of Biscay (SW France). *Quaternary International*. 2022; 613: 46-60. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.09.018>.
11. Liu W., Wang G., Yu M., Chen H., Jiang Y. Multimodel future projections of the regional vegetation-climate system over East Asia: Comparison between two ensemble approaches. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2020; 125: e2019JD031967. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019JD031967>
12. География Курганской области: краеведческое пособие / И.В. Абросимова, Т.Г. Акимова, О.В. Аршевская [и др.]; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Курганский государственный университет, Зауральское отделение Русского географического общества; [ред.коллегия: Н.И. Науменко, О.Г. Завьялова, Т.Г. Акимова]. Издательство Курганского государственного университета. 2019; 275. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41555104>
13. Эбель А.Л., Эбель Т.В., Зыкова Е.Ю., Михайлова С.И. Флористические находки в Западной Сибири и на Южном Урале. *Turczaninowia*. 2022; №3: 207-216. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49541636>
14. Cherepanova O.; Petrova I.; Sannikov S.; Mishchihina Y. Diagnostics and description of a new subspecies of *Calluna vulgaris* (L.) Hull from Western Siberia. *Horticulturae*. 2023; 9: 386-397. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae9030386>
15. Третьякова А.С. Редкие лесные растительные сообщества национального парка «Припышминские боры» (Свердловская область). *Экобиотех*, 2020; 3(3): С. 370-378. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44280506>
16. Власенко М.В., Трубакова К.Ю. Водный режим видов семейства *Poaceae* в условиях засухи. *АВУ*. 2019; 11 (190): 2-8. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41376259>
17. Zhu Y., Cheng Z, Feng K., Chen Z. Cao Ch., Huang J., Ye H., Gao Y. Influencing factors for transpiration rate: a numerical simulation of an individual leaf system. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2022; 27: 101-110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.101110>.
18. Кочубей А.А. Изучение влияния динамики влажности лесного напочвенного покрова на прорастание семян *Pinus sylvestris* L. с помощью экспериментального "лизиметрического" метода. *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2023; 242: 102-114. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50504398>
19. Sannikov S.N., Sannikova N.S., Petrova I.V. et al. The forecast of fire impact on *Pinus sylvestris* renewal in southwestern Siberia. *J. For. Res*. 2021; 32: 1911–1919. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01260-1>
20. Nalevanková P, Sitková Z, Kučera J, Štřelcová K. Impact of water deficit on seasonal and diurnal dynamics of European beech transpiration and time-lag effect between stand transpiration and environmental drivers. *Water*. 2020; 12(12): 3437. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12123437>
21. Arrowsmith K. Reynolds C., Briggs V.A., Heather M., Berry J. Community context mediates effects of pollinator loss on seed production. *Ecosphere*. 2023; 14(6): e4569. DOI: <https://doi.org/10.1002/ecs2.4569>

22. Wu X, Zhang R, Bento V.A, Leng S, Qi J, Zeng J, Wang Q. The effect of drought on vegetation gross primary productivity under different vegetation types across China from 2001 to 2020. *Remote Sensing*. 2022; 14(18): 4658. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14184658>.

References

1. Shi L., Liu H., Wang L., Peng R., He H., Liang B., Cao J. Transitional responses of tree growth to climate warming at the southernmost margin of high latitudinal permafrost distribution, *Science of The Total Environment*, 2023, 168503. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168503>.
2. Grau-Andrés R., Matt Davies G., Waldron S., Scott E. M., Gray A. Increased fire severity alters initial vegetation regeneration across *Calluna*-dominated ecosystems, *Journal of Environmental Management*. 2019; 231: 1004-1011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.113>.
3. Log T. Modeling drying of degenerated *Calluna vulgaris* for wildfire and prescribed burning risk assessment. *Forests*. 2020; 11: 759-765. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11070759>
4. Schellenberg J., Bergmeier E. The *Calluna* life cycle concept revisited: implications for heathland management. *BiodiversConserv*. 2022; 31: 119–141. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10531-021-02325-1>
5. Gen S., Stanley M.J. Whole leaf comparative study of stomatal conductance models. *Frontiers in Plant Science*. 2022; 13. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.766975>
6. Hagedorn F., Dawes M.A., Bubnov M.O., Devi N.M., Grigoriev A.A., Mazepa V.S., Shiyatov S.G., Moiseev P.A., Nagimov Z.Y. Latitudinal decline in stand biomass and productivity at the elevational treeline in the Ural mountains despite a common thermal growth limit. *Journal of Biogeography*. 2020; 47(8): 1827-1842. DOI: <https://doi.org/10.1111/jbi.13867>.
7. Potter C., Changes in vegetation cover of the arctic national wildlife refuge estimated from modis greenness trends. *Earth Interact*. 2019; 23: 1–18. DOI: <https://doi.org/10.1175/EI-D-18-0018.1>.
8. Napier J.D, De Lafontaine G, Hu F.S. Exploring genomic variation associated with drought stress in *Picea mariana* populations. *Ecol Evol*. 2020; 10(17): 9271-9282. DOI: <https://doi.org/10.1002/ece3.6614>
9. Bajsholanov S.S., Pavlova V.N., ZHakieva A.R., CHernov D.A., Gabbasova M.S. Agroklimatiche-skie resursy Severnogo Kazahstana. *Gidrometeorologicheskije issledovaniya i prognozy*. 2018; 1 (367): 168-184. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35138146>
10. Eynaud F., Verdin F., Mary Y., Beaudouin C., López-Romero E., Penaud A., Colin Ch., Culioli C. Holocene climate dynamics on the European scale: Insights from a coastal archaeological record from the temperate Bay of Biscay (SW France). *Quaternary International*. 2022; 613: 46-60. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.09.018>.
11. Liu W., Wang G., Yu M., Chen H., Jiang Y. Multimodel future projections of the regional vegetation-climate system over East Asia: Comparison between two ensemble approaches. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2020; 125: e2019JD031967. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019JD031967>
12. Geografiya Kurganskoj oblasti: kraevedcheskoe posobie / I.V. Abrosimova, T.G. Akimova, O.V. Arshevskaya [i dr.]; Ministerstvo nauki i vysshego obrazovaniya Rossijskoj Federacii, Kurganskij gosudar-stvennyj universitet, Zaural'skoe otdelenie Russkogo geograficheskogo obshchestva; [red.kollegiya: N.I. Naumenko, O.G. Zav'yalova, T.G. Akimova]. Izdatel'stvo Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. 2019; 275. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41555104>
13. Ebel' A.L., Ebel' T.V., Zykova E.YU., Mihajlova S.I. Floristicheskie nahodki v Zapadnoj Sibiri i na YUzhnom Urale. *Turczaninowia*. 2022; №3: 207-216. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49541636>
14. Cherepanova O.; Petrova I.; Sannikov S.; Mishchihina Y. Diagnostics and description of a new subspecies of *Calluna vulgaris* (L.) Hull from Western Siberia. *Horticulturae*. 2023; 9: 386-397. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae9030386>
15. Tret'yakova A.S. Redkie lesnye rastitel'nye soobshchestva nacional'nogo parka «Pripyshmin-skie bory» (Sverdlovskaya oblast'). *Ekobiotech*, 2020; 3(3): S. 370-378. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44280506>

16. Vlasenko M.V., Trubakova K.YU. Vodnyj rezhim vidov semejstva Poaceae v usloviyah zasuhi. AVU. 2019; 11 (190): 2-8. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41376259>
17. Zhu Y., Cheng Z, Feng K., Chen Z. Cao Ch., Huang J., Ye H., Gao Y. Influencing factors for transpiration rate: a numerical simulation of an individual leaf system. Thermal Science and Engineering Progress. 2022; 27: 101-110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.101110>.
18. Kochubej A.A. Izuchenie vliyaniya dinamiki vlazhnosti lesnogo napochvennogo pokrova na pro-rastanie se-myan Pinus sylvestris L. s pomoshch'yu eksperimental'nogo "lizimetricheskogo" metoda. Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii. 2023; 242: 102-114. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50504398>
19. Sannikov S.N., Sannikova N.S., Petrova I.V. et al. The forecast of fire impact on *Pinus sylvestris* renewal in southwestern Siberia. J. For. Res. 2021; 32: 1911–1919. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01260-1>
20. Nalevanková P, Sitková Z, Kučera J, Štřelcová K. Impact of water deficit on seasonal and diurnal dynamics of European beech transpiration and time-lag effect between stand transpiration and environmental drivers. Water. 2020; 12(12): 3437. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12123437>
21. Arrowsmith K. Reynolds C., Briggs V.A., Heather M., Berry J. Community context mediates effects of pollinator loss on seed production. Ecosphere. 2023; 14(6): e4569. DOI: <https://doi.org/10.1002/ecs2.4569>
22. Wu X, Zhang R, Bento V.A, Leng S, Qi J, Zeng J, Wang Q. The effect of drought on vegetation gross primary productivity under different vegetation types across China from 2001 to 2020. Remote Sensing. 2022; 14(18): 4658. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14184658>

Сведения об авторах

✉ *Кочубей Алена Анатольевна* – кандидат биол. наук, научный сотрудник лаборатории Популяционной биологии древесных растений и динамики леса, Ботанический сад УрО РАН, ул. 8 Марта, 202а, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620144, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8568-9999>, e-mail: 79326010873@yandex.ru.

Черепанова Ольга Евгеньевна – кандидат биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории Популяционной биологии древесных растений и динамики леса, Ботанический сад УрО РАН, ул. 8 Марта, 202а, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620144, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7775-6488>, e-mail: botgarden.olga@gmail.com.

Петрова Ирина Владимировна – доктор биол. наук, зав. лабораторией Популяционной биологии древесных растений и динамики леса, Ботанический сад УрО РАН, ул. 8 Марта, 202а, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620144, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5689-8452>, e-mail: irina.petrova@botgard.uran.ru

Information about the authors

✉ *Alena A. Kochubey* – candidate of biological sciences, researcher of laboratory of Population biology of woody plants and forest dynamics, Russian Academy of Sciences, Ural Branch: Institute Botanic Garden, March 8 st., 202a, Yekaterinburg, Russian Federation, 620144, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8568-9999>, e-mail: 79326010873@yandex.ru.

Olga E. Cherepanova – candidate of biological sciences, senior researcher of laboratory of Population biology of woody plants and forest dynamics, Russian Academy of Sciences, Ural Branch: Institute Botanic Garden, March 8 st., 202a, Yekaterinburg, Russian Federation, 620144, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7775-6488>, e-mail: botgarden.olga@gmail.com.

Irina V. Petrova – doctor of biological Sciences, head of laboratory of Population biology of woody plants and forest dynamics, Russian Academy of Sciences, Ural Branch: Institute Botanic Garden, March 8 st., 202a, Yekaterinburg, Russian Federation, 620144, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5689-8452>, e-mail: irina.petrova@botgard.uran.ru

✉ – Для контактов | Corresponding author

ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Научный журнал

2023 Том 13 № 4 (52) Часть 1

Подписано в печать 29.12.2023. Формат 60×90 1/8.

Дата выхода в свет XX.XX.2023. Цена р.

Усл. печ. л. 28,0. Уч.-изд. л. 45,8. Тираж 1000 экз. Заказ

Издатель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»

Адрес редакции и издателя: ФГБОУ ВО «ВГЛТУ»

394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8

телефон (473) 253-72-90, факс (473) 253-76-51, e-mail: lesteh@vglta.vrn.ru

Отпечатано в Участке оперативной полиграфии ФГБОУ ВО «ВГЛТУ»

394087, г. Воронеж, ул. Докучаева, 10

LESOTEKHNICHESKII ZHURNAL

Scientific journal

2023 Vol. 13 № 4 (52) Part 1

Signed to be published 29.12.2023. Format 60×90 1/8.

Publication date XX.XX.2023. Price rub.

Cond. print. sh. 28,0. Acc.-print. sh. 45,8. Printing 1000 copies. Order

Publisher: FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov» (FSBEI HE «VSUFT»)

Publisher address: FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov»

Timiryazeva str., 8, Voronezh 394087

phone (473) 253-72-90, fax (473) 253-76-51, e-mail: lesteh@vglta.vrn.ru

Printed at the Department of Operational Printing

FSBEI HE «VSUFT»

Dokuchaeva str., 10, Voronezh 394087