

DOI: 10.37482/0536-1036

ISSN 0536-1036

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Лесной журнал

Научный рецензируемый журнал

Основан в 1833 г.
Издается в серии ИВУЗ с 1958 г.
Выходит 6 раз в год

5

2022

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ – СЕВЕРНЫЙ (АРКТИЧЕСКИЙ)
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

МЕЛЕХОВ В.И. – гл. редактор, д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
БАБИЧ Н.А. – зам. гл. редактора, д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Архангельск)
БОГОЛИЦЫН К.Г. – зам. гл. редактора, д-р хим. наук, проф. (Россия, Архангельск)
АНГЕЛЬСТАМ П. – зам. гл. редактора по европейскому направлению, д-р наук, проф. (Швеция, Скиннскаттеберг)
КОМАРОВА А.М. – отв. секретарь, канд. с.-х. наук (Россия, Архангельск)

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:

Бессчетнов В.П., д-р биол. наук, проф. (Россия, Нижний Новгород)
Богданович Н.И., д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Буй Тэ Дой, д-р наук, науч. сотр. (Вьетнам, Ханой)
Ван Хайнинген А., д-р наук, проф. (США, Ороно)
Воронин А.В., д-р техн. наук, проф. (Россия, Петрозаводск)
Гаврилова О.И., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Петрозаводск)
Ефремова С.В., д-р техн. наук, проф. (Республика Казахстан, Алматы)
Залесов С.В., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Екатеринбург)
Кожухов Н.И., д-р экон. наук, проф., акад. РАН (Россия, Москва)
Корчагов С.А., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Вологда)
Куров В.С., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Лупашку Т.Г., д-р хим. наук, проф., акад. АНМ (Республика Молдова, Кишинев)
Матвеева Р.Н., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Красноярск)
Мерзленко М.Д., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Москва)
Мясищев Д.Г., д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Наквасина Е.Н., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Нимц П., д-р наук, проф. (Швейцария, Цюрих)
Обливин А.Н., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Онегин В.И., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Памфилов Е.А., д-р техн. наук, проф. (Россия, Брянск)
Посыпанов С.В., д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Сакса Т., д-р с.-х. наук, ст. науч. сотр. (Финляндия, Хельсинки)
Санаев В.Г., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Сергеевичев В.В., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Сёренсен У.Я., д-р наук, проф. (Норвегия, Стейнхьер)
Сигурдссон Б.Д., д-р наук, проф. (Исландия, Хваннейри)
Усольцев В.А., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Екатеринбург)
Хабаров Ю.Г., д-р хим. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Хакимова Ф.Х., д-р техн. наук, проф. (Россия, Пермь)
Хоанг Ван Сэм, д-р наук, науч. сотр. (Вьетнам, Ханой)
Холуша О., д-р наук, проф. (Чехия, Брно)
Царев А.П., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Воронеж)
Черных В.Л., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Йошкар-Ола)
Энгельманн Х.-Д., д-р инж. наук, проф. (Германия, Эмден)

DOI: 10.37482/0536-1036

ISSN 0536-1036

Lesnoy Zhurnal

(Russian Forestry Journal)

Scientific peer-reviewed journal

Established in 1833

Issued as part of the

“Bulletin of Higher Educational Institutions” since 1958

Published bi-monthly

5

2022

FOUNDER AND PUBLISHER: NORTHERN (ARCTIC)
FEDERAL UNIVERSITY NAMED AFTER M.V. LOMONOSOV

EDITORIAL BOARD:

MELEKHOV V.I. – Editor-in-Chief, Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
BABICH N.A. – Deputy Editor-in-Chief, Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
BOGOLITSYN K.G. – Deputy Editor-in-Chief, Doctor of Chemistry, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
ANGELSTAM P. – Deputy Editor-in-Chief of the European Department, PhD, Prof. (Sweden, Skinnskatteberg)
KOMAROVA A.M. – Executive Secretary, Candidate of Agriculture (Russia, Arkhangelsk)

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD:

Besschetnov V.P., Doctor of Biology, Prof. (Russia, Nizhny Novgorod)
Bogdanovich N.I., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Bui The Doi, PhD, Senior Researcher (Vietnam, Hanoi)
Van Heiningen A., PhD, Prof. (USA, Orono)
Voronin A.V., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Petrozavodsk)
Gavrilova O.I., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Petrozavodsk)
Efremova S.V., Doctor of Engineering, Prof. (Republic of Kazakhstan, Almaty)
Zalesov S.V., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yekaterinburg)
Kozhukhov N.I., Doctor of Economics, Prof., Academician of the Russian Academy of Sciences (Russia, Moscow)
Korchagov S.A., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Vologda)
Kurov V.S., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Lupascu T.G., Doctor of Chemistry, Prof., Academician of the Academy of Sciences of Moldova (Republic of Moldova, Chisinau)
Matveeva R.N., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Krasnoyarsk)
Merzlenko M.D., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Moscow)
Myasishchev D.G., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Nakvasina E.N., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Niemz P., PhD, Prof. (Switzerland, Zurich)
Oblivin A.N., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
Onegin V.I., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Pamfilov E.A., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Bryansk)
Posypanov S.V., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Saksa T., Doctor of Agriculture, Senior Researcher (Finland, Helsinki)
Sanaev V.G., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
Sergeevichev V.V., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Sørensen O.J., PhD, Prof. (Norway, Steinkjer)
Sigurðsson B.D., PhD, Prof. (Iceland, Hvanneyri)
Usol'tsev V.A., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yekaterinburg)
Khabarov Yu.G., Doctor of Chemistry, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Khakimova F.Kh., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Perm)
Hoang Van Sam, PhD, Senior Researcher (Vietnam, Hanoi)
Holuša O., PhD, Prof. (Czech Republic, Brno)
Tsarev A.P., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Voronezh)
Chernykh V.L., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yoshkar-Ola)
Engelmann H.-D., Doctor of Engineering, Prof. (Germany, Emden)



СОДЕРЖАНИЕ

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

- А.П. Царев, Р.П. Царева, В.А. Царев, Н.В. Лаур.* Селекционные испытания факториальных гибридов *Populus tremula* L. в ювенильном возрасте..... 9
- А.К. Габделхаков, В.Ф. Коновалов, З.З. Рахматуллин, Л.Н. Блонская, И.И. Фазлутдинов.* Модели для оценки биомассы и объема коры деревьев липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.)..... 21
- М.Д. Мерзленко, П.Г. Мельник, А.А. Коженкова.* Интродукция климатипов лиственницы европейской в зоне смешанных лесов..... 37
- Р.В. Михалищев, Т.Б. Сродных.* Семенное размножение видов рода *Spiraea* L. в условиях ботанического сада Уральского федерального университета..... 47
- А.С. Соломенцева.* Состояние древесных растений на объектах защитного лесоразведения и озеленения Калачевского района Волгоградской области..... 58
- Е.А. Тишкина, Л.А. Семкина, И.В. Шевелина.* Расширение ареала *Cotoneaster lucidus* Schlecht. в лесопарках г. Екатеринбурга..... 73

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

- В.И. Посметьев, В.О. Никонов, А.Ю. Мануковский, В.В. Посметьев.* Компьютерное моделирование работы рекуперативного поворотного коникового устройства лесовозного тягача с прицепом-ропуском..... 85
- Г.Н. Колесников, О.И. Григорьева, И.В. Григорьев, В.А. Макуев, Т.Н. Стородубцева, В.В. Швецова.* Моделирование критических локальных деформаций коры растущего дерева при ветровой нагрузке..... 100
- К.Д. Жук, С.А. Угрюмов, Ф.В. Свойкин, В.Ф. Свойкин.* Размерно-качественные характеристики круглых сортиментов, заготавливаемых с применением многооперационных лесных машин..... 114

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

- А.В. Сергеевичев, В.А. Соколова, И.И. Костюков, А.Е. Михайлова, С.А. Войнаш.* Абразивный инструмент из сферокорунда для обработки древесины..... 131

- Ю.Г. Скурыдин, Е.М. Скурыдина.* Послойный динамический модуль сдвига в поперечном сечении древесностружечной плиты..... 143

*ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ
И ПРОИЗВОДСТВО ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ*

- А.А. Пенкин, Я.В. Казаков.* Структурно-морфологические свойства вторичного волокна из влагопрочного сырья при мягком размоле. Часть 1. Характеристика волокон..... 157
- Р.Г. Сафин, В.Г. Сотников, Л.Ю. Грунин, М.С. Иванова, Д.Ф. Зиатдинова.* Контроль качества активированного угля методом ядерного магнитного резонанса..... 173

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

- Д.М. Адаи, Д.Ф. Эшун, Э.Д. Марфо, Н.А. Бабич, В.И. Мелехов, Д.Н. Клевцов.* Лесные ресурсы Республики Гана..... 186
- К.Л. Михайлов, С.В. Горбунова, Д.Х. Файзулин.* Создание тепличных комплексов для выращивания посадочного материала сосны..... 195
-



CONTENTS

FORESTRY

- A.P. Tsarev, R.P. Tsareva, V.A. Tsarev, N.V. Laur.* Breeding Tests of Juvenile Factorial Hybrids of *Populus tremula* L..... 9
- A.K. Gabdelkakov, V.F. Konovalov, Z.Z. Rakhmatullin, L.N. Blonskaya, I.I. Fazlutdinov.* Biomass and Volume Estimation Models for Bark of Small-Leaved Linden (*Tilia cordata* Mill.)..... 21
- M.D. Merzlenko, P.G. Melnik, A.A. Kozhenkova.* Introduction of European Larch Climatypes in the Mixed Forest Zone..... 37
- R.V. Mikhailishchev, T.B. Srodnykh.* Seed Propagation of *Spiraea* L. Species in the Botanical Garden of the Ural Federal University..... 47
- A.S. Solomentseva.* The Condition of Woody Plants at the Sites of Protective Afforestation and Landscaping of the Kalachevsky District, Volgograd Region. 58
- E.A. Tishkina, L.A. Semkina, I.V. Shevelina.* Range Expansion of *Cotoneaster lucidus* Schlecht. in Forest Parks of Yekaterinburg..... 73

LOGGING TECHNOLOGIES

- V.I. Posmetyev, V.O. Nikonov, A.Yu. Manukovskii, V.V. Posmetyev.* Computer Simulation of the Operation of the Recuperative Swivel Bunk Device of a Hauling Tractor with a Timber Drug..... 85
- G.N. Kolesnikov, O.I. Grigoreva, I.V. Grigorev, V.A. Makuev, T.N. Storodubtseva, V.V. Shvetsova.* Modeling of Critical Local Deformations of Growing Tree Bark under Wind Loads..... 100
- K.D. Zhuk, S.A. Ugryumov, F.V. Svoikin, V.F. Svoikin.* Dimension and Quality Specifications of Round Logs Harvested with the Use of Multi-Operational Forest Machines..... 114

MECHANICAL TECHNOLOGY OF WOOD AND WOOD SCIENCE

- A.V. Sergeevichev, V.A. Sokolova, I.I. Kostyukov, A.E. Mikhailova, S.A. Voinash.* Abrasive Tools Made of Spherical Corundum in Wood Working..... 131
- Yu.G. Skurydin, E.M. Skurydina.* Layer-by-Layer Dynamic Shear Modulus in the Cross-Section of a Particle Board..... 143

*TECHNOLOGY OF CHEMICAL WOOD PROCESSING AND PRODUCTION
OF WOOD-POLYMER COMPOSITES*

A.A. Penkin, Ya.V. Kazakov. Changes in the Morphological Characteristics of Secondary Fiber Obtained from Wet-Strength Paper during Gentle Refining of Recycled Pulp. Part 1. Fiber Characteristics..... 157

R.G. Safin, V.G. Sotnikov, L.Yu. Grunin, M.S. Ivanova, D.F. Ziatdinova. Quality Control of Activated Carbon by the Nuclear Magnetic Resonance Method 173

BRIEF SUMMARIES AND EXPERIENCE EXCHANGE

G.M. Adayi, J.F. Eshun, E.D. Marfo, N.A. Babich, V.I. Melekhov, D.N. Klevtsov. Forest Resources of the Republic of Ghana..... 186

K.L. Mikhaylov, S.V. Gorbunova, D.H. Fayzulin. Creation of Greenhouse Complexes for Growing Pine Planting Material..... 195



Научная статья
УДК 630*232.13
DOI: 10.37482/0536-1036-2022-5-9-20

Селекционные испытания факториальных гибридов *Populus tremula* L. в ювенильном возрасте

А.П. Царев¹✉, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [S-6639-2019](https://orcid.org/0000-0001-8019-0016),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8019-0016>

Р.П. Царева¹, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [AAK-2110-2021](https://orcid.org/0000-0002-6949-4665),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6949-4665>

В.А. Царев^{1,2}, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [ABE-5600-2020](https://orcid.org/0000-0002-3921-9339),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3921-9339>

Н.В. Лаур³, д-р с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [AAL-1770-2021](https://orcid.org/0000-0003-1989-0384),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1989-0384>

¹Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии, ул. Ломоносова, д. 105, г. Воронеж, Россия, 394087; antsa-55@yandex.ru✉, tsarais42@mail.ru, vad.tsareff@yandex.ru

²Воронежский государственный лесотехнический университет, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия, 394087; vad.tsareff@yandex.ru

³Петрозаводский государственный университет, просп. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910; laur@petsu.ru

Поступила в редакцию 15.10.20 / Одобрена после рецензирования 21.01.21 / Принята к печати 25.01.21

Аннотация. Осина характеризуется быстрым ростом, неприхотливостью к условиям местопроизрастания, ценной древесиной и рядом других полезных свойств. На евроазиатском материке наибольшие площади занимает осина вида *Populus tremula* L. К сожалению, она имеет значительный недостаток – поражаемость сердцевинной гнилью *Fomes igniarius* Fr. Множество исследователей проводили селекционный отбор гнилеустойчивых насаждений и отдельных деревьев осины в естественных лесах, а затем перешли к искусственной гибридизации. Кроме различных вариантов скрещиваний представляет интерес факториальная гибридизация, при которой несколько женских особей скрещиваются с несколькими мужскими. Полученные при этом гибриды позволяют определить наилучшие родительские индивидуумы или их пары. Впервые факториальная гибридизация *P. tremula* в стране была осуществлена в Центральном-Черноземном регионе России в 2015–2016 гг. в рамках международного сотрудничества с германским Институтом лесной генетики имени Тюнена по проекту MARussia. Цель работы заключалась в проведении гибридизации, создании полевого опыта по сортоиспытанию полученных гибридов и наблюдении за ними для выявления лучших гибридов и родителей. Гибриды испытывали на опытных полевых объектах в Воронежской и Липецкой областях. В настоящей публикации приведены результаты полевых испытаний на Латненском сортоиспытательном участке в Семилукском районе Воронежской области (51°42' с. ш. 38°56' в. д.; общая площадь – 2160 м²). Сохранность

растений разных гибридных семей в 4-летнем полевом опыте колебалась от 67 до 100 %. В среднем она была 88 %. Средняя высота растений этого возраста в отдельных семьях варьировала от $349 \pm 38,7$ до $510 \pm 30,0$ см, составляя в среднем по опыту 419 см. Средний диаметр на высоте 1,3 м равнялся 3,4 см с колебаниями по семьям от 2,4 до 4,6 см. Средние по семьям размеры видовых цилиндров гибридов осин – $3,5 \text{ дм}^3$ с колебаниями от 1,7 до $7,7 \text{ дм}^3$. Предварительно установлены общая и специфическая комбинационные способности использованных родительских форм. Результаты сопоставлены с результатами испытаний, проведенных в других странах. Выполненные лабораторные и полевые эксперименты по гибридизации *P. tremula* L. в Центральном Черноземье позволят определить лучшие родительские формы и отобрать ряд хозяйственно ценных гибридов.

Ключевые слова: осина, факториальная гибридизация, сердцевинная гниль, полевое сортоиспытание, видовые цилиндры, общая комбинационная способность, специфическая комбинационная способность, Центральное Черноземье

Благодарности: Авторы благодарят коллег из ВНИИЛГИСбиотех за помощь при выращивании гибридов, создании испытательного сортоучастка и уходе за ним. Особую благодарность авторы выражают M. Fladung и G. von Wühlisch из германского Института лесной генетики им. Тюнена за творческое сотрудничество по проекту MARussia (грант 68706 BLE), а также директору Института лесных, инженерных и строительных наук ПетрГУ А.В. Питухину за подписание согласия на сотрудничество с германским Институтом лесной генетики им. Тюнена. Авторы благодарят Институт леса КарНЦ РАН за письмо поддержки актуальности исследований по заявленному гранту.

Для цитирования: Царев А.П., Царева Р.П., Царев В.А., Лаур Н.В. Селекционные испытания факториальных гибридов *Populus tremula* L. в ювенильном возрасте // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 5. С. 9–20. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-9-20>

Original article

Breeding Tests of Juvenile Factorial Hybrids of *Populus tremula* L.

Anatoly P. Tsarev^{1✉}, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [S-6639-2019](https://orcid.org/0000-0001-8019-0016),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8019-0016>

Raisa P. Tsareva¹, Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist;
ResearcherID: [AAK-2110-2021](https://orcid.org/0000-0002-6949-4665), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6949-4665>

Vadim A. Tsarev^{1,2}, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [ABE-5600-2020](https://orcid.org/0000-0002-3921-9339),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3921-9339>

Natalia V. Laur³, Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAL-1770-2021](https://orcid.org/0000-0003-1989-0384),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1989-0384>

¹All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology, ul. Lomonosova, 105, Voronezh, 394087, Russian Federation; antsa-55@yandex.ru[✉], tsarais42@mail.ru, vad.tsareff@yandex.ru

²Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, ul. Timiryazeva, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; vad.tsareff@yandex.ru

³Petrozavodsk State University, prosp. Lenina, 33, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910, Russian Federation; laur@petrsu.ru

Received on October 15, 2020 / Approved after reviewing on January 21, 2021 / Accepted on January 25, 2021



Abstract. The aspen is known for its rapid growth, unpretentiousness to growing conditions, valuable timber and some other useful properties. The largest areas on the Eurasian continent are occupied by *Populus tremula* L. Unfortunately, it is susceptible to heart rot *Fomes igniarius* Fr., which is a significant drawback. Considering this drawback many scientists had carried out selection of rot-resistant stands and individual aspen trees in natural forests, and later proceeded to artificial hybridization. Besides different crossing options, factorial hybridization, in which several females are crossed with several males, is of interest. The resulting hybrids provide an opportunity to determine the best parental individuals or their pairs. Factorial hybridization of *P. tremula* in Russia was first carried out in the Central Chernozem region in 2015–2016 within the framework of international cooperation with the Institute of Forest Genetics of the Johann Heinrich von Thünen-Institute (Germany) under the MARussia project. The purpose of the work was to carry out hybridization, create a field experiment on variety testing of the resulting hybrids and observe them to identify the best hybrids and parents. The hybrids were tested at experimental field sites in the Voronezh and Lipetsk regions. This paper presents the results of field testing at the Latnoye variety test plot in the Semiluky district of the Voronezh region (51°42' N, 38°56' E; total area – 2,160 m²). Survival of plants of different hybrid families in the 4-year field experiment ranged from 67 to 100 %; on average, it was 88 %. The average height of plants at this age in individual families varied from 349±38.7 to 510±30.0 cm, being on average 419 cm in the experiment. The average diameter at breast height (1.3 m) was 3.4 cm with fluctuations by families from 2.4 to 4.6 cm. The average size of species cylinders of aspen hybrids by families was 3.5 dm³ with fluctuations from 1.7 to 7.7 dm³. The general and specific combining abilities of the parental forms had been preliminarily found. The results have been compared with the results obtained in other countries. Performed laboratory and field experiments on hybridization of *P. tremula* L. in the Central Chernozem region will allow to determine the best parental forms and select a number of economically valuable hybrids.

Keywords: aspen, factorial hybridization, heart rot, field variety testing, species cylinders, general combining ability, specific combining ability, Central Chernozem Region

Acknowledgements: The authors are grateful to their colleagues at the All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology (Voronezh, Russia) for their help in cultivation of hybrids, development of the testing plot and maintenance thereof. Special thanks to Dr. M. Fladung and Dr. G. von Wühlisch from the Institute of Forest Genetics of the Johann Heinrich von Thünen-Institute (Großhansdorf, Germany) for creative collaboration on the MARussia project (grant 68706, BLE) and to Prof. A.V. Pitukhin, Director of the PetrSU Institute of Forestry, Engineering and Construction Sciences, for signing an agreement for cooperation with the Institute of Forest Genetics of the Johann Heinrich von Thünen-Institute. The authors appreciate the letter of support for the relevance of research on the stated grant from the Forest Research Institute of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Tsarev A.P., Tsareva R.P., Tsarev V.A., Laur N.V. Breeding Tests of Juvenile Factorial Hybrids of *Populus tremula* L. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 5, pp. 9–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-9-20>

Введение

Осина – один из самых распространенных видов тополя в России и в мире. В России занимаемая этой породой площадь в 2013 г. превышала 24 млн га – 2-е место в мире [3]. Среди зарубежных стран наиболее обширные по территории осиновые леса (более 40 млн га) находятся в Канаде [10]. Осина быстро растет, неприхотлива к условиям местопроизрастания, обладает некоробящейся древесиной, но имеет крупный недостаток – поражаемость сердцевинной гнилью *Fomes igniarius* Fr.

Учитывая этот недостаток, множество исследователей проводили селекционный отбор гнилеустойчивых насаждений и отдельных деревьев осины в естественных лесах. В Советском Союзе и России пионером таких работ был А.С. Яблоков [6–8], имевший десятки последователей в разных регионах страны. Эти ученые являются авторами сотни работ. Последняя из подобных публикаций, посвященная памяти А.С. Яблокова, издана во Всероссийском научно-исследовательском институте лесоводства и механизации лесного хозяйства в 2021 г. [1].

Кроме отбора в естественных насаждениях России ряд исследователей, включая и А.С. Яблокова [8], в течение второй половины XX в. проводили работы по искусственной гибридизации осины с последующим отбором гнилеустойчивых особей. Некоторые из исследователей получили положительные результаты [2, 4, 16].

Гибридизация за рубежом, где занимались скрещиванием *Populus tremula* × *P. tremuloides* и наоборот, интенсивно проводилась в Германии [19, 20]. Обширный обзор гибридизации тополей с участием *P. tremula*, *P. tremuloides*, *P. davidiana* в странах Северной Америки, Европы и Азии осуществили В.Ж. Stanton et al. [14].

Среди различных видов скрещиваний представляет интерес факториальная гибридизация, при которой несколько женских особей скрещиваются с несколькими мужскими. Она считается одной из лучших, поскольку включает все возможные варианты скрещиваний и дает почти полную информацию о генетических характеристиках используемых родительских деревьев. Схема может давать информацию об общей (ОКС) и специфической (СКС) комбинационной способностях.

Полученный при этом материал после полевых испытаний позволяет отобрать наилучшие родительские индивидуумы или их пары [22]. К сожалению, схема очень трудна для осуществления, особенно с экономической точки зрения. Кроме того, нередко при проведении реальных опытов по гибридизации в силу различных причин (нескрещиваемость, гибель семян или всходов от грибковых заболеваний, повреждение энтомофитовредителями и др.) не удается сохранить целиком полученные гибриды.

Впервые в России факториальная гибридизация осины проведена в Центрально-Черноземном регионе России в 2015–2016 гг. В 1-й год подобраны и исследованы родительские формы, а также апробированы скрещивания. В 2016 г. получены новые гибриды. Работа была начата в рамках международного сотрудничества с немецким Институтом лесной генетики имени Тюнена по проекту MARussia. С германской стороны по проекту работали М. Fladung и G. Von Wühlisch [12]. С российской стороны кроме авторов настоящей публикации в исследованиях участвовали еще 2 группы – из Москвы [11] и Санкт-Петербурга [21].

Согласно проекту, при работе в Центральном Черноземье предполагалось решение следующих задач:

оценить существующие полевые опыты и клональные архивы для выявления осин, показывающих контрастные характеристики по продуктивности биомассы, устойчивости к грибковым заболеваниям и повреждению энтомофитовредителями, переносимости засухи, фенологическим характеристикам, чтобы определить деревья, на примере которых можно в последующем изучать расщепления;

собрать образцы листьев для анализа, выявить подходящие генные маркеры для пыльцы деревьев, которые будут использованы при скрещивании;

выполнить скрещивания отобранных кандидатов деревьев, чтобы получить сегрегирующие потомства в достаточном числе для дальнейшего генетического анализа (100–300 сеянцев на каждый вариант скрещиваний);

вырастить потомства в питомнике для последующего испытания;

дать фенотипическую оценку важных черт отобранных деревьев, как показано в первой задаче;

создать полевой опыт долгосрочных наблюдений за потомствами.

Проведены начальные 2-летние гибридизационные работы, получены семена, всходы, и выращен гибридный материал в количествах, превышающих задание, и у большего, чем в задании, числа вариантов скрещиваний. Отобраны лучшие гибридные сеянцы, из которых созданы 2 полевых испытательных участка в Липецкой и Воронежской областях.

Итоги наблюдений первых лет были опубликованы в нескольких научных работах [5, 12, 17], где отражены результаты, полученные в лабораториях, данные роста 2-летних сеянцев в питомнике и 3-летних растений на постоянных испытательных участках.

В настоящей работе представлены результаты 4-летних полевых испытаний гибридов осины, полученных соавторами в 2016 г. вблизи с. Латное Воронежской области. К настоящему времени стало возможным определить не только высоту испытываемых растений, но и их объемные характеристики.

Целью настоящей публикации было подведение кратких итогов исследований, определение лучших гибридных семей и отдельных гибридов, прошедших 2-летние испытания в теплице (2016–2017 гг.) и 4-летний цикл полевого сортоиспытания (2018–2021 гг.).

Объекты и методы исследования

Латненский сортоучасток находится в Семилукском районе Воронежской области. Географические координаты участка – 51°42' с. ш. 38°56' в. д.; общая площадь – 2160 м²; подготовка почвы: зяблевая вспашка в 2016 г., поддержание черного пара механизированной культивацией в следующем году, перепашка с боронованием и посадка под лопату 2-летними гибридными сеянцами осины осенью 2017 г.

Размещение – 4 × 2 м. Посадка осуществлена в 3-кратной повторности. Смещение делянок гибридов рандомизированное. Почва участка вышла из-под сельхозпользования и представлена черноземом обыкновенным суглинистым. По всему периметру сортоучастка высажены опушечные ряды из тополей.

Всего на Латненском сортоучастке высажено 198 гибридных сеянцев осины от 19 сибсовых и 6 полусибсовых семей. От каждой семьи высажено по 9 гибридов (по 3 гибрида на делянку).

В последующие 2 года в междурядьях проведена тракторная культивация, а в рядах – ручная прополка (по 4 раза в год). Летом 3-го года осуществ-

влено 3 ухода, но в отдельных случаях появились корневые отпрыски осин, и от тракторной культивации пришлось отказаться. Уходы 4-го года в рядах и междурядьях выполнены 1 раз в июле ручной бензинокосилкой. Общий вид сортоучастка представлен на рисунке.



Полевой 4-летний сортоучасток гибридов осины вблизи с. Латное Семилукского района Воронежской области (17 июля 2021 г.)

A 4-year-old field variety test plot of aspen hybrids near the Latnoye village, Semiluky district, Voronezh region. July 17, 2021

Измерения растений осуществлены в сентябре. Фиксировали высоту (H , см) и диаметр ствола на высоте 1,3 м (D , см). По этим показателям рассчитывали объемы видовых цилиндров (ВЦ, дм^3): $\text{ВЦ} = \pi D^2 / 4H = D^2 \cdot 0,785H$.

По ВЦ определили наиболее быстрорастущие гибриды осины в возрасте 4 лет. ОКС и СКС родительских растений по ВЦ найдены в соответствии с методикой [22]. Для проведения расчетов и построения графиков использована программа Excel.

Результаты исследования и их обсуждение

Динамика роста в высоту гибридов осин при разном сочетании родительских форм в течение 4 лет испытаний представлена в табл. 1. Как видно из приведенных данных, прирост по высоте в 1-й год в целом составил 41 см, во 2-й – 116 см, в 3-й – 86 см и в 4-й – 99 см. То есть после стресса в период приживаемости в течение 1-го года приросты в последующие 3 года были около 1 м/год. Из 19 вариантов скрещиваний в 1-ю пятерку (ранги 1–5) вошли семьи со средними высотами от 440 до 510 см.

В некоторых семьях со средними показателями встречались деревья с высотой 570 (семья № 18), 520 (семья № 19), 580 (семья № 14), 510 см (семья № 16) и др. Если такие деревья сохраняют хороший рост, они могут быть отобраны в категорию лучших.

Таблица 1

**Сохранность и динамика роста гибридов осины по высоте
на Латненском сортоучастке в течение 4 лет
Survival and growth dynamics of aspen hybrids by height
at the Latnoye variety test plot for 4 years**

№ гибридной семьи	Вариант скрещивания	Высажено, шт.	Сохранность в 4 года, %	Высота посадочного материала, см	Средняя высота, см, в возрасте, лет				Ранги в 4 года
					1	2	3	4	
1	10-03 × 08-02	9	89	118	179	289	350	464 ± 33,0	4
3	10-03 × 07-02	7	86	75	103	240	315	371 ± 37,5	18
4	10-03 × 32-03	9	89	85	139	288	380	471 ± 31,9	3
5	10-03 × 45-03	9	100	103	158	277	376	473 ± 32,0	2
6	10-03 × 48-02	9	89	57	107	211	286	349 ± 38,7	19
<i>Итого и среднее по материнской форме</i>		43	91	88	137	262	350	430	–
2	18-02 × 08-02	9	89	67	115	216	299	378 ± 31,4	17
7	18-02 × 07-02	2	100	119	156	260	375	510 ± 30,0	1
10	18-02 × 32-03	9	78	74	119	242	324	420 ± 8,5	10
11	18-02 × 45-03	9	78	80	124	219	307	433 ± 45,0	6
12	18-02 × 48-02	9	89	44	117	274	364	440 ± 28,4	5
9	18-02 × Ос _{local}	7	100	81	136	216	287	412 ± 33,9	11
<i>Итого и среднее по материнской форме</i>		45	87	78	128	238	326	421	–
13	23-05 × 07-02	6	100	29	83	212	298	388 ± 43,6	14
14	23-05 × 08-02	9	89	94	134	219	294	381 ± 54,5	15
15	23-05 × 32-03	2	100	30	78	199	275	380 ± 60,0	16
19	23-05 × 45-03	9	89	66	122	228	339	425 ± 38,5	8
<i>Итого и среднее по материнской форме</i>		26	92	55	104	215	302	397	–
16	45-01 × 08-02	9	78	87	121	214	314	427 ± 33,3	7
17	45-01 × 45-03	3	100	80	115	215	303	407 ± 77,9	13
18	45-01 × 48-02	9	67	38	63	197	279	409 ± 51,9	12
<i>Итого и среднее по материнской форме</i>		21	76	68	100	207	299	417	–
8	02-01 × 08-02	9	89	114	160	229	307	420 ± 27,9	9
<i>Всего и среднее по всем материнским формам</i>		144	88	77	118	234	320	419	–

Данные о диаметрах 4-летних растений осины позволили определить средние ВЦ всех гибридных семей (табл. 2).

Таблица 2

**Диаметры и объемы видовых цилиндров 4-летних гибридов осины
на Латненском сортоучастке**
**Diameters and volumes of species cylinders of 4-year-old aspen hybrids
at the Latnoye variety test plot**

№ гибридной семьи	Вариант скрещивания	Диаметр, см	ВЦ, дм ³	Ранги ВЦ на 4-й год
1	10-03 × 08-02	4,6	7,7	1
3	10-03 × 07-02	3,1	2,8	15
4	10-03 × 32-03	3,9	5,6	4
5	10-03 × 45-03	3,9	5,6	3
6	10-03 × 48-02	2,5	1,7	18
<i>Итого и среднее по материнской форме</i>		3,7	3,2	–
2	18-02 × 08-02	3,1	2,9	14
7	18-02 × 07-02	4,1	7,1	2
10	18-02 × 32-03	3,2	3,4	10
11	18-02 × 45-03	3,3	3,7	8
12	18-02 × 48-02	3,7	4,7	5
9	18-02 × Ос _{local}	3,2	3,3	11
<i>Итого и среднее по материнской форме</i>		3,4	4,1	–
13	23-05 × 07-02	2,9	2,6	16
14	23-05 × 08-02	3,5	3,7	9
15	23-05 × 32-03	2,4	1,7	19
19	23-05 × 45-03	3,5	4,1	6
<i>Итого и среднее по материнской форме</i>		3,3	2,6	–
16	45-01 × 08-02	3,1	3,2	12
17	45-01 × 45-03	3,0	2,9	13
18	45-01 × 48-02	2,8	2,5	17
<i>Итого и среднее по материнской форме</i>		2,9	2,9	–
8	02-01 × 08-02	3,5	4,0	7
<i>Итого и среднее по всем материнским формам</i>		3,4	3,5	–

Как видно из табл. 2, в лучшую пятерку по ВЦ вошли гибриды семей 10-03 × 08-02, 18-02 × 07-02, 10-03 × 45-03, 10-03 × 32-03 и 18-02 × 48-02. Их ВЦ выше средних показателей семей на 30–120 % и составляют в среднем 6,14 дм³, отличаясь в большую сторону по сравнению с общей средней величиной этого показателя по всем материнским формам в 1,8 раза.

Расчет ОКС использованных родительских особей осин по ВЦ представлен в табл. 3.

Таблица 3

Общая и специфическая комбинационная способности родительских особей гибридных семей осин по видовым цилиндрам в возрасте 4 лет

General and specific combining abilities of parental individuals of hybrid aspen families by species cylinders at the age of 4

Материнские формы	Отцовские формы						Среднее	ОКС
	08-02	07-02	32-03	45-03	48-02	Ос _{local}		
10-03	7,7	2,8	5,6	5,6	1,7	–	4,68	0,95
18-02	2,9	7,1	3,4	3,7	4,7	3,3	4,18	0,45
23-05	3,7	2,6	1,7	4,1	–	–	3,02	–0,71
45-01	3,2	–	–	2,9	2,5	–	2,86	–0,87
02-01	4,0	–	–	–	–	–	4,00	0,27
Среднее	4,24	4,16	3,57	4,08	2,97	3,30	3,73	–
ОКС	0,51	0,43	–0,16	0,35	–0,76	–0,43	–	–

Из данных табл. 3 следует, что наиболее высокая ОКС, согласно рассчитанным ВЦ, у родительских деревьев наблюдалась среди материнских растений осины 10-03, а среди отцовских – у 08-02. Наиболее низкая ОКС была у материнского дерева 45-01 и у отцовского 48-02.

СКС оказалась наиболее высокой у родительской пары 10-03 × 08-02. На 2-м месте пара 18-02 × 07-02, на последних двух местах – гибридное потомство семей 23-05 × 32-03 и 10-03 × 48-02.

Ряд высоких деревьев из семей, не вошедших в лучшую пятерку, показали и высокий диаметр. В результате они отличались и значительными ВЦ. Здесь есть деревья с ВЦ, равным 8,92 (семья № 18); 7,0 (семья № 19); 16,6 (семья № 14); 7,96 дм³ (семья № 16) и др. После достижения возраста стабилизации рангов роста из числа данных деревьев можно будет построить выборку лучших гибридов осины.

Поскольку осина обладает рядом хозяйственно ценных свойств [5], ее гибридизацией занимаются во многих зарубежных странах: Германии [13, 19, 20], Швеции [15] Эстонии [18], Канаде [9] и др. [14].

В частности, в Германии в Шлезвиг-Гольштейне (53°47' с. ш. 10°31' в. д., 37 м над ур. м.) в течение 5 лет исследовали сохранность, рост в высоту и по диаметру 14 клонов *P. × wettsteinii* (*P. tremula* × *P. tremuloides*) [13]. В 5-летних растениях сохранность была значительно ниже (от 7 до 88 %), чем в 4-летнем опыте в Латном (от 67 до 100 %, в среднем 88 %). Приросты в высоту гибридов в германском опыте явно превышали эти показатели растений Латненского участка. У разных клонов *P. × wettsteinii* средние приросты по высоте колебались от 1,26 до 1,68 м. На Латненском сортоучастке текущий прирост достиг только 63–139 см. Диаметры на высоте груди в германском опыте составляли от 4,7 до 6,5 см, что было выше, чем на Латненском сортоучастке. Средние диаметры в Латном колебались от 2,8 до 4,6 см, хотя отдельные гибридные растения в этом возрасте достигали диаметра 6,1–6,7 см.

В Швеции изучали рост 4-летних гибридов осины варианта *P. tremula* × *P. tremuloides* [15]. Средняя высота растений в различных условиях местопрорастания была от 163 до 517 см. Это близко к варьированию

средних высот различных вариантов скрещиваний осины обыкновенной *P. tremula* на Латненском участке.

В Эстонии наблюдали за ростом гибридов *P. tremula* L. × *P. tremuloides* Michx. [18]. В Германии этот вариант гибридов показывал хорошие результаты роста. В Эстонии он уступал факториальным гибридам *P. tremula* L. латненского и германского опыта. Так, средняя высота 5-летних растений в Эстонии колебалась в различных почвенных условиях от 1,3 до 4,0 м. В то время как на Латненском сортоучастке 4-летние гибриды имели среднюю высоту по всем вариантам 4,2 м с вариацией средних показателей по 5 лучшим гибридным семьям от 4,4 до 5,1 м.

В обзоре В.Ж. Stanton, М.Ж. Serapiglia, Л.В. Smart [14] показано, что в разных условиях в разных странах получены неодинаковые результаты. Это зависит от используемого сортового и гибридного материала и многих других факторов, как абиотических и биотических, так и технических и технологических. В связи с чем для достижения положительных результатов необходимо проводить обширные опыты в различных регионах.

Выполненные лабораторные и полевые эксперименты по скрещиванию *P. tremula* L. в Центральном Черноземье позволяют надеяться на последующие положительные результаты гибридизации.

Выводы

Проведенные на Латненском сортоучастке в Центральном Черноземье полевые опыты с выведенными новыми гибридами *Populus tremula* L. показали следующие результаты.

1. Сохранность растений на 4-летнем постоянном участке у разных гибридных семей колебалась от 67 до 100 %, составляя в среднем 88 %.

2. Средняя высота растений на этом участке в отдельных семьях варьировала от 349 до 510 см, равняясь в среднем по опыту 419 см. В Германии средние приросты по высоте у разных клонов осины *P. × wettsteinii* колебались от 1,26 до 1,68 м/год. На Латненском участке текущий прирост в 4-летних гибридных семьях достигал только 63–139 см/год. Средняя высота 5-летних растений в Эстонии колебалась в различных почвенных условиях от 1,3 до 4,0 м, что было существенно ниже, чем в опыте на Латненском сортоучастке.

3. Средний диаметр на высоте 1,3 м на Латненском сортоучастке у растений составлял 3,4 см с вариацией по семьям от 2,4 до 4,6 см. Диаметры гибридов в германском 5-летнем опыте колебались от 4,7 до 6,5 см – такие показатели были больше, чем в 4-летних семьях Латненского сортоучастка. Хотя отдельные наиболее крупные растения в латненском опыте достигали в этом возрасте диаметра 6,1–6,7 см.

4. Средние по семьям размеры видовых цилиндров гибридов осин Латненского сортоучастка составляли 3,5 дм³ с колебаниями от 1,7 до 7,7 дм³. В коллекции в разных семьях встречались отдельные деревья с объемом видового цилиндра 8,92; 7,0; 16,6; 7,96 дм³ и др. После достижения возраста стабилизации рангов роста можно будет отобрать из числа всех этих деревьев представительную выборку лучших гибридов осины для перспективных ассортиментов.

5. Исследование общей и специфической комбинаторных способностей использованных родительских форм показало, что наиболее высокая общая комбинаторная способность по видовым цилиндрам среди материнских растений у осины 10-03, а среди отцовских – у 08-02. Специфическая комбинаторная способность была наиболее высокой у родительских пар 10-03 × 08-02 (1-е место здесь) и 18-02 × 07-02 (2-е место). Дальнейшее изучение этих показателей позволит отобрать лучшие пары родителей для создания биклоновых семенных плантаций осины.

6. Для достижения положительных результатов гибридизации необходимо проводить обширные опыты в различных регионах. Выполненные лабораторные и полевые эксперименты по скрещиванию *P. tremula* L. в Центральном Черноземье позволят определить лучшие родительские формы и отобрать ряд хозяйственно ценных гибридов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Багаев Е.С., Макаров С.С., Багаев С.С., Родин С.А. Исполинская осина: биологические особенности и перспективы плантационного выращивания: моногр. Пушкино: ВНИИЛМ, 2021. 72 с.

Bagaev E.S., Makarov S.S., Bagaev S.S., Rodin S.A. *Giant Aspen: Biological Features and Prospects of Plantation Cultivation*: Monograph. Pushkino, VNIILM Publ., 2021. 72 p. (In Russ.).

2. Владимиров Б.Н. Гибридизация осины // Науч. тр. Моск. лесотехн. ин-та. 1972. Вып. 43. С. 49–57.

Vladimirov B.N. Aspen Hybridization. *Nauchnyye trudy Moskovskogo lesotekhnicheskogo instituta*, 1972, iss. 43, pp. 49–57. (In Russ.).

3. Государственный лесной реестр 2013: стат. сб. М.: Рослесинфорг, 2014. 690 с. *State Forest Register 2013: Statistical Collection*. Moscow, Roslesinforg Publ., 2014. 690 p. (In Russ.).

4. Петрухнов В.П. Гибридизация осины в ЦЧО // Гибридизация лесных древесных пород: сб. науч. тр. / отв. ред. А.П. Царев. Воронеж: ЦНИИЛГиС, 1988. С. 101–106.

Petrukhnov V.P. Aspen Hybridization in the Central Chernozem Region. *Hybridization of Forest Wood Species: Collection of Academic Papers*. Ed. by A.P. Tsarev. Voronezh, TSNIILGiS Publ., 1988, pp. 101–106. (In Russ.).

5. Царев А.П., Царева Р.П., Царев В.А., Евлаков П.М. Гибридизация тополей: моногр. / под общ. ред. А.П. Царева; М-во науки и высшего образования РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛУ». Воронеж, 2021. 289 с.

Tsarev A.P., Tsareva R.P., Tsarev V.A., Evlakov P.M. *Hybridization of Poplars*: Monograph. Ed. by A.P. Tsarev. Voronezh, 2021. 289 p. (In Russ.).

6. Яблоков А.С. Исполинская форма осины в лесах СССР. // Тр. ВНИИЛХ, 1941. Вып. 23. 52 с.

Yablokov A.S. Giant Form of Aspen in the Forests of the USSR. *Trudy VNIILKh*, 1941, iss. 23. 52 p. (In Russ.).

7. Яблоков А.С. Воспитание и разведение здоровой осины. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1949. 276 с.

Yablokov A.S. *Breeding and Planting of Healthy Aspen*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1949. 276 p. (In Russ.).

8. Яблоков А.С. Воспитание и разведение здоровой осины. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Гослесбумиздат, 1963. 442 с.

Yablokov A.S. *Breeding and Planting of Healthy Aspen*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1963. 442 p. (In Russ.).

9. Böhlenius H., Övergaard R., Asp H. Growth Response of Hybrid Aspen (*Populus×wettsteinii*) and *Populus trichocarpa* to Different pH Levels and Nutrient Avail-

abilities. *Canadian Journal of Forest Research*, 2016, vol. 46(11), pp. 1367–1374. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2016-0146>

10. Carle J. Trends & Perspectives in Poplar & Willow Cultivation – A Global Synthesis of National Progress (Plenary Report). *Abstracts of Submitted Papers on the 25th Session of the International Poplar Commission in Berlin (Germany) “Poplars and Other Fast-Growing Trees – Renewable Resources for Future Green Economies”*. Working Paper IPC/14. Rome, Forestry Policy and Resources Division of FAO, 2016, pp. 1–34. Available at: <http://www.fao.org/forestry/ipc/69946/en> (accessed 15.10.20)

11. Chernyshenko O., Rumyantsev D., Sirotova A. Aspen Clonal Sustainability Assessment in Natural Populations by Tree-Ring Based Information. *Proceedings of the German Russian Conference on Forest Genetics*. Braunschweig, Thünen-Institut, 2018, pp. 17–22. <https://doi.org/10.3220/REP1539855736000>

12. Fladung M., von Wühlisch G. Improving the Productivity, Resistance, and Adaptability in Poplar – Development of Genetic Markers for Aspen (“MaRussiA”). *Proceedings of the German Russian Conference on Forest Genetics*. Braunschweig, Thünen-Institut, 2018, pp. 9–15. <https://doi.org/10.3220/REP1539855736000>

13. Liesebach M., Schneck V. Clone Test with Hybrid Aspen (As130). *Proceedings of the German Russian Conference on Forest Genetics*. Braunschweig, Thünen-Institut, 2018, pp. 127–130. <https://doi.org/10.3220/REP1539855736000>

14. Stanton B.J., Serapiglia M.J., Smart L.B. The Domestication and Conservation of *Populus* and *Salix* Genetic Resources. *Poplars and Willows: Trees for Society and the Environment*. Ed. by J.G. Isebrands, J. Richardson. Rome, FAO, 2014, pp. 124–199. <https://doi.org/10.1079/9781780641089.0124>

15. Stener L.-G., Westin J. Early Growth and Phenology of Hybrid Aspen and Poplar in Clonal Field Tests in Scandinavia. *Silva Fennica*, 2017, vol. 51, no. 3, art. 5656. <https://doi.org/10.14214/sf.5656>

16. Tsarev A.P. Growth and Breeding of Aspen in Russia. *Silvae Genetica*, 2013, vol. 62, iss. 4-5, pp. 153–160. <https://doi.org/10.1515/sg-2013-0020>

17. Tsarev A., Tsareva R., Tsarev V., Fladung M., von Wühlisch G. Aspen Hybridization: Parents’ Compatibility and Seedlings’ Growth. *Silvae Genetica*, 2018, vol. 67, iss. 1, pp. 12–19. <https://doi.org/10.2478/sg-2018-0002>

18. Tullus H., Tullus A., Soo T., Vares A. Hybrid Aspen (*Populus tremula* L. × *P. tremuloides* Michx.) Complex Study Programme in Hemiboreal Estonia. *Proceedings of the 23rd Session of IPC*. Beijing, 2008. 32 p.

19. Von Wühlisch G. Ergebnisse der Züchtung von Pappeln und Aspen in Großhansdorf. Perspektiven für die Energie – und Rohstoffherzeugung. *Pflanzenzüchtung Großhansdorf*, 2006, vol. 70, pp. 157–172. [In Ger.].

20. Von Wühlisch G. Growth Performance of F₁-Hybrids, Backcrossed Hybrids and F₂-Hybrids of *Populus tremula* and *Populus tremuloides*. *Proceedings of the 5th International Poplar Symposium “Poplars and Willows: From Research Models to Multipurpose Trees for a Bio-Based Society”*. Orvieto, Italy, 2010. 37 p.

21. Zhigunov A.V., Ulianich P.S., Lebedeva M.V., Potokina E.K. Development of Research Resources for Marker-Assisted Selection of Aspen (*Populus tremula* L.) in Russia. *Proceedings of the German Russian Conference on Forest Genetics*. Braunschweig, Thünen-Institut, 2018, pp. 35–39. <https://doi.org/10.3220/REP1539855736000>

22. Zobel B., Talbert J. *Applied Forest Tree Improvement*. New York, John Wiley, 1984. 505 p.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors’ Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья

УДК 630*524.39:630*523:630.526.5

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-5-21-36

Модели для оценки биомассы и объема коры деревьев липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.)

А.К. Габделхаков^{1✉}, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [G-3023-2018](https://orcid.org/0000-0001-7129-880X).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7129-880X>

В.Ф. Коновалов¹, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [G-2775-2018](https://orcid.org/0000-0003-2020-5540).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2020-5540>

З.З. Рахматуллин¹, канд. с.-х. наук; ResearcherID: [G-2247-2018](https://orcid.org/0000-0002-3223-6726).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3223-6726>

Л.Н. Блонская¹, канд. биол. наук, доц.; ResearcherID: [G-4819-2018](https://orcid.org/0000-0002-7007-1643).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7007-1643>

И.И. Фазлутдинов², вед. специалист; ResearcherID: [C-9581-2019](https://orcid.org/0000-0003-0327-3752).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0327-3752>

¹Башкирский государственный аграрный университет, ул. 50-летия Октября, д. 34, г. Уфа, Республика Башкортостан, Россия, 450001; aliya201199@mail.ru[✉], konovalov-48@mail.ru, zagir1983@mail.ru, l.n.blonskaya@mail.ru

²Министерство лесного хозяйства Республики Башкортостан, ул. Ленина, д. 86, г. Уфа, Республика Башкортостан, Россия, 450006; solnc2007@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.11.20 / Одобрена после рецензирования 04.02.21 / Принята к печати 06.02.21

Аннотация. Цель исследования – анализ изменчивости и разработка математических моделей оценки биомассы и объема коры, объема ствола в коре, доли коры деревьев липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.), произрастающих в естественных порослевых и искусственных древостоях. Модели основаны на данных 107 и 95 деструктивно отобранных деревьев соответственно в естественных порослевых и искусственных древостоях – по 10 пробных площадей на каждый тип древостоев, представляющих различные стадии роста. Модельные деревья были распилены на 2-метровые секции, объемы которых в коре и без коры рассчитаны с использованием формулы Губера. Общий объем ствола дерева в коре и без коры получен суммированием объемов всех секций и конического объема вершины дерева. Разница двух этих параметров составила объем коры. Биомасса коры определена непосредственным взвешиванием с последующим переводом в абсолютно сухую массу. Оценены корреляционные связи дендрометрических параметров и выбранных характеристик дерева. В сравнительном аспекте изучена эффективность 3 моделей регрессии с использованием в качестве независимых переменных диаметра на высоте 1,3 м и высоты дерева. Биомасса и объем коры, объем ствола в коре сильно зависят от данных величин. Для объемной доли коры в естественных порослевых липняках эта корреляция очень слабая, в искусственных – незначимая. Объемная доля коры для каждого дерева рассчитана как отношение разности объема ствола в коре и без коры к объему ствола в коре. Для прогнозирования биомассы и объема коры, объема стволов в коре деревьев липы мелколистной выбрано уравнение, показавшее лучшие статистические характеристики с точки зрения соответствия. Модели оценены с использованием метода взвешенных наименьших квадратов,



с учетом присущих ошибок, гетероскедастичности, путем придания каждой модели своей весовой функции отдельно для естественных порослевых и искусственных древостоев, существенно различающихся между собой по морфометрическим признакам.

Ключевые слова: диаметр ствола на высоте 1,3 м, высота дерева, биомасса коры, объем ствола, объем коры, доля коры, липа мелколистная, моделирование, ошибки модели, оценка биомассы коры

Для цитирования: Габделхаков А.К., Коновалов В.Ф., Рахматуллин З.З., Блонская Л.Н., Фазлутдинов И.И. Модели для оценки биомассы и объема коры деревьев липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 5. С. 21–36. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-21-36>

Original article

Biomass and Volume Estimation Models for Bark of Small-Leaved Linden (*Tilia cordata* Mill.)

Aydar K. Gabdelkhakov[✉], Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [G-3023-2018](https://orcid.org/0000-0001-7129-880X),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7129-880X>

Vladimir F. Konovalov¹, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [G-2775-2018](https://orcid.org/0000-0003-2020-5540),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2020-5540>

Zagir Z. Rakhmatullin¹, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [G-2247-2018](https://orcid.org/0000-0002-3223-6726),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3223-6726>

Liubov N. Blonskaya¹, Candidate of Biology, Assoc. Prof.; ResearcherID: [G-4819-2018](https://orcid.org/0000-0002-7007-1643),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7007-1643>

Ilyas I. Fazludinov², Leading Specialist; ResearcherID: [C-9581-2019](https://orcid.org/0000-0003-0327-3752),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0327-3752>

¹Bashkir State Agrarian University, ul. 50-letiya Oktyabrya, 34, Ufa, Republic of Bashkortostan, 450001, Russian Federation; aliya201199@mail.ru[✉], konovalov-48@mail.ru, zagir1983@mail.ru, l.n.blonskaya@mail.ru

²Ministry of Forestry of the Republic of Bashkortostan, ul. Lenina, 86, Ufa, Republic of Bashkortostan, 450006, Russian Federation; solnc2007@yandex.ru

Received on November 1, 2020 / Approved after reviewing on February 4, 2021 / Accepted on February 6, 2021

Abstract. The research is aimed at analyzing variability and developing mathematical models for estimating bark biomass and volume, volume of trunk with bark, and bark proportion of small-leaved linden (*Tilia cordata* Mill.) trees growing in natural coppice and artificial stands. The models are based on data from 107 and 95 destructively sampled trees in natural coppice and artificial stands, respectively. There were 10 sampling areas per stand type, representing different growth stages. The model trees were sawn into 2-meter sections, the volumes of which with and without bark were calculated using the Huber formula. The total volume of the tree trunk with and without bark is obtained by summing the volumes of all sections and the conical volume of the tree top. The bark volume was the difference between these two parameters. The bark biomass was determined by direct weighing, followed by conversion to absolutely dry mass. The correlations between the dendrometric parameters and the selected tree characteristics were estimated. The effectiveness of 3 regression models



using the diameter at breast height ($dbh = 1.3$ m) and the tree height (h) as independent variables was studied in a comparative aspect. The bark biomass and volume, and the volume of trunk with bark are strongly influenced by these values. This correlation is very weak for the bark volume proportion in natural coppice stands, and insignificant in artificial stands. The bark volume proportion for each tree was calculated as the ratio of the difference between the volume of trunk with and without bark and the volume of trunk with bark. The equation that showed the best statistical characteristics in terms of consistency was chosen in order to predict the bark biomass and volume, the volume of trunks with bark of small-leaved linden trees. These models were estimated using the weighted least squares method taking into account the inherent errors and heteroscedasticity, by assigning each model its weight function separately for natural coppice and artificial stands that differ significantly from each other in morphometric features.

Keywords: trunk diameter at breast height, tree height, bark biomass, trunk volume, bark volume, bark proportion, small-leaved linden, modeling, errors, bark biomass estimation

For citation: Gabdelkhakov A.K., Konovalov V.F., Rakhmatullin Z.Z., Blonskaya L.N., Fazlutdinov I.I. Biomass and Volume Estimation Models for Bark of Small-Leaved Linden (*Tilia cordata* Mill.). *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 5, pp. 21–36. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-21-36>

Введение

Липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill.) широко распространена по всей Европе: от Англии на западе и до Уральских гор на востоке, от южной Скандинавии на севере и до Средиземноморья на юге [15, 30]. При этом большая часть лесов с преобладанием липы мелколистной приходится на Восточную Европу [6]. В лесном фонде Республики Башкортостан по состоянию на 2021 г. древостой с преобладанием липы занимают 1161,1 тыс. га (22,4 % покрытых лесом земель региона) с общим запасом 215,4 тыс. м³ (27,5 %), что составляет свыше 30 % от всех насаждений липы мелколистной Российской Федерации.

Насаждения с участием липы широко используются для заготовки древесины и биоэнергетического сырья, получения недревесной продукции, прежде всего меда. Цветы, листья, плоды и кора липы применяются в фармакологической промышленности [3]. Данный древесный вид обогащает биоразнообразие лесных экосистем [34, 41], существенно улучшает среду обитания растений и животных, имеет высокую ландшафтную и рекреационную ценность [18]. В прошлом липовый луб был сырьем для производства плетеных и веревочных товаров [4, 27, 33]. В настоящее время этот натуральный материал полностью заменен на искусственные дешевые материалы. Значительный сырьевой потенциал коры липы мелколистной остается нерезализованным, кора обращается в отходы.

Многоцелевое и экологически обоснованное ведение лесного хозяйства в насаждениях липы мелколистной предполагает наличие разносторонней информации о лесных ресурсах. Имеющиеся сортиментные и товарные таблицы для липы мелколистной ограничены: количество коры представлено в процентах от общего объема ствола в зависимости от диаметра на высоте 1,3 м, высоты (разряда высоты) дерева при среднем коэффициенте формы ствола. По данным этих таблиц кора у липы может составлять значительную часть – от 15 до 40 % от общего объема дерева [1]. Такой широкий спектр варьирования

требует более точного определения объема и биомассы коры стволов (*BSB*) не только при производстве лесной продукции [14, 21, 35], но и в целях мониторинга [16, 29, 42] и количественной оценки запасов углерода [28, 40], а также для выбора эффективных технологий, приносящих дополнительный доход лесному сектору экономики [38].

Объем коры, как и ее биомасса, зависят от ряда факторов: вида [7, 17, 23], диаметра и высоты дерева, формы ствола, толщины коры [24, 44], возраста [21, 37], генетических особенностей [20], местопрорастания [7, 8], среды обитания и условий окружающей среды [9, 12, 45], применяемой технологии выращивания леса [14, 25, 39].

Для прогнозирования биомассы и объема коры многие исследователи используют регрессионные модели с легко измеримыми морфометрическими параметрами в качестве предикторов, такими как диаметр на высоте 1,3 м и общая высота дерева [8, 39]. Повысить предсказательную способность моделей предлагается применением в качестве дополнительных аргументов ширины и протяженности кроны [26], возраста деревьев [32], двойной толщины коры и др. [12, 31, 36].

Исследования по моделированию биомассы и объема коры, их доли достаточно многочисленны и посвящены в основном главным лесным видам, таким как сосна [22, 23, 44], лиственница [8, 13, 25], ель [22, 23, 31], пихта [7, 38], дуб [7, 26, 44], береза [22, 23, 43], осина [23] и ольха [14]. Липа мелколистная в данном научном направлении изучена крайне слабо, особенно на региональном уровне.

Эта работа является частью многолетних исследований надземной биомассы естественных порослевых и искусственных насаждений липы мелколистной в Башкирском Предуралье. Цель – проанализировать изменчивость биомассы и объема коры, объемной доли коры для деревьев липы мелколистной в естественных и искусственных древостоях, разработать модели для оценки исследуемых параметров с учетом основных дендрометрических характеристик и определить существенность различий между предлагаемыми моделями оценки биомассы и объема коры липы мелколистной, в том числе по типам насаждений.

Объекты и методы исследования

Исследования проведены в Уфимском лесничестве Республики Башкортостан, которое относится к лесостепной зоне Южно-Уральского лесостепного района европейской части РФ. Координаты – 54°70' с. ш. 55°90' в. д., высота над уровнем моря – 150 м. Климат увлажненный, континентальный, со средней годовой температурой 3 °С, средняя температура января – –14,5 °С, июля – +19,5 °С, абсолютные максимум и минимум – +40 и –50 °С соответственно. Среднее годовое количество осадков находится в пределах 500–600 мм, в вегетационный период выпадает около 350 мм осадков.

Изучены естественные насаждения порослевого происхождения и искусственные древостои липы мелколистной. Заложено по 10 временных пробных площадей в насаждениях II–VIII классов возраста, относящихся к I–III классам бонитета.

Проведены измерения модельных деревьев, срубленных в естественных порослевых (107 шт.) и искусственных (75 шт.) древостоях. На каждой пробной площади выбрано по 8–10 модельных деревьев, относящихся к средним ступеням толщины. В выборку не включены большие, деформированные и отмирающие деревья. После удаления ветвей ствол каждого модельного дерева был разделен на 2-метровые секции, выполнены замеры диаметров в коре и без коры. Секции взвешены в коре и без коры на платформенных весах грузоподъемностью 100 кг (с точностью ± 50 г). Отбор образцов коры проведен в разных точках вдоль ствола с их последующей сушкой в лабораторных условиях для определения сухой массы коры по соотношению абсолютно сухой и сырой масс.

У каждого модельного дерева измерены диаметры на концах секций, на высоте 1,3 м в коре (dbh) и без коры, а также высота (h). Это позволило рассчитать объемы секций ствола в коре и без коры с использованием формулы Губера. Вершинная часть дерева обработана в виде конуса. Общий объем ствола дерева в коре (TV) и без коры (WV) получен путем суммирования объемов всех секций и объема конической вершины дерева. Разница TV и WV составила объем коры (BV). Объемная доля коры ствола (PBV) рассчитывалась как отношение BV к TV , выраженное в процентах. Сводная статистика данных модельных деревьев в выборках показывает удовлетворительный охват размерного распределения (табл. 1).

Таблица 1

Сводная статистика данных модельных деревьев
Summary statistics of model trees data

Показатель	Естественные древостои						Искусственные древостои					
	X	X _{min}	X _{max}	S	As	Ex	X	X _{min}	X _{max}	S	As	Ex
dbh , см	18,40	3,10	37,40	8,83	-0,06	-0,78	15,90	3,70	37,20	7,65	0,82	0,18
h , м	17,00	4,80	23,80	5,70	-1,02	-0,40	15,40	6,00	24,80	4,20	-0,01	-0,54
TV , м ³	0,3188	0,0020	1,1011	0,2706	0,7900	0,0500	0,2150	0,0046	0,9558	0,2401	1,6500	1,9100
BV , м ³	0,0694	0,0004	0,2371	0,0566	0,8100	0,4000	0,0446	0,0008	0,1892	0,0485	1,4700	1,1900
BSB , кг	30,90	0,20	92,90	23,28	0,48	-0,44	21,70	0,50	103,10	24,78	1,70	2,02
PBV , %	23,80	14,80	44,70	4,77	1,59	4,19	21,10	12,50	32,50	4,20	0,32	-0,01

Примечание: X – среднее арифметическое; X_{min}, X_{max} – минимальное и максимальное значения соответственно; S – стандартное отклонение; As, Ex – коэффициенты асимметрии и эксцесса соответственно.

Оценка взаимосвязи биометрических параметров модельных деревьев и параметров коры внутри выделенных совокупностей и между собой проведена на основе корреляции Пирсона. Регрессионный анализ выполнен методом наименьших квадратов, широко применяемым для разработки как моделей биомассы отдельных деревьев и их компонентов [26, 36, 39], так и объема ствола дерева [8, 14, 44]. В качестве математических моделей были выбраны следующие функции:

$$Y = b_1 + b_2 X; \quad (1)$$

$$Y = b_1 + X^{b_2}; \quad (2)$$

$$Y = \frac{X}{b_1 + b_2 X}, \quad (3)$$

где Y – расчетный показатель (зависимая переменная); X – независимая переменная; b_1 и b_2 – параметры модели.

В качестве независимых переменных в моделях для оценки биомассы, объема коры и общего объема ствола применены dbh и $(dbh)^2 h$. Статистическая оценка полученных уравнений проведена по скорректированному коэффициенту детерминации ($Adj.R^2$), средней абсолютной ошибке (MAE) и среднеквадратической ошибке (RMSE). Наиболее подходящей названа модель с наибольшим $Adj.R^2$ и наименьшими MAE и RMSE.

Дополнительно оценены значимость b_1 и b_2 по t -критерию Стьюдента, графики остатков по отношению к оценочным параметрам. Выбран уровень значимости $p = 0,05$. Наличие (отсутствие) автокорреляции случайных отклонений модели установлено методом графического анализа и статистики Дарбина–Уотсона (DW).

Существование мультиколлинеарности между независимыми переменными проверено с помощью теста Феррара–Глобера (FG):

$$FG = - \left[n - 1 - \frac{1}{6}(2k + 5) \right] \ln(\det[R]),$$

где n – количество наблюдений; k – количество факторов (параметров модели); $\det[R]$ – определитель матрицы межфакторных корреляций.

Выполнено сравнение фактического значения критерия FG и табличного значения χ^2 Пирсона со степенью свободы $\frac{1}{2}k(k-1)$ и уровнем значимости $p = 0,05$ [2, 5].

Проверка наличия мультиколлинеарности каждой переменной с другими проведена путем расчета коэффициента инфляции дисперсии (VIF):

где R_j^2 – коэффициент детерминации, когда переменная X_j подвергается регрессии по $j-1$ оставшимся независимым переменным.

$$VIF_j = \frac{1}{1 - R_j^2},$$

VIF является полезным индикатором при выявлении переменной, которая может быть причиной мультиколлинеарности. Значение $VIF = 1$ указывает на отсутствие мультиколлинеарности между данной независимой переменной и любыми другими независимыми переменными в модели. При $1 < VIF < 5$ существует умеренная мультиколлинеарность между данной объясняющей переменной и другими независимыми переменными в модели, но это не рассматривается как серьезная проблема. Если значение VIF лежит в интервале $5 < VIF < 10$, то возникают незначительные проблемы, связанные с коллинеарностью, в интервале $VIF > 10$ – серьезные. Получение завышенных VIF свидетельствует о необходимости выбора переменных, их модификации или изменения самой модели [2, 5, 19].

Другой обычной проблемой при корректировке уравнений BSB , TV , BV и их независимых переменных (dbh и h) становится проверка наличия

гетероскедастичности. Она была осуществлена путем графического анализа наличия систематичности в распределении значений квадратов отклонений от предсказанных значений и теста Бреуша–Пагана [10].

Статистически значимая гетероскедастичность скорректирована нелинейной регрессией методом взвешенных наименьших квадратов. На основе анализа остатков применены специальные весовые функции $w = (dbh^2h)^{-q}$ в зависимости от модели *BSB*, *TV* и *BV* для обоих типов древостоев, q – поправочный коэффициент гетероскедастичности, определяемый с использованием методологии оптимизации [46].

Для оценки различий уравнений для двух типов насаждений было рассчитано среднеквадратическое отклонение, %:

$$\sigma = 200 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{a_i - b_i}{a_i + b_i} \right)^2}{n-1}},$$

где a_i и b_i – попарно сравниваемые данные расчетных значений (Y) зависимых переменных (*BSB*, *TV*, *BV*) соответственно для естественных порослевых древостоев и для лесных культур; n – число сравниваемых пар, шт.

Статистические и математические расчеты, анализ проведены с использованием программ Microsoft Excel и Statistica. Небольшие наборы данных, а также ограниченность ресурсов для получения деструктивным способом новых независимых данных не позволили провести валидацию моделей. Этот этап оставлен открытым для будущих исследований.

Результаты исследования и их обсуждение

Средние, минимальные и максимальные значения рассматриваемых параметров, их стандартное отклонение удовлетворительно охватывают распределение параметров по выборкам с немного превосходящим количеством по низшим классам при достаточно больших вариации и стандартном отклонении. Коэффициент вариации для *BSB* и *BV* значительный – 82–114 %, в то время как для *PBV* – средний (20 %).

В табл. 2 представлена корреляционная матрица Пирсона для исследуемых переменных. У *BSB*, *TV*, *BV* выявлена существенная и достоверная связь с *dbh* и *h*. Это означает, что параметры *BSB*, *TV* и *BV* увеличиваются с размерами деревьев. В случае с *PBV* взаимосвязь для естественных древостоев средняя и отрицательная, т. е. доля коры уменьшается с увеличением размера деревьев. В искусственных древостоях липы *PBV* характеризуется низким и недостоверным коэффициентом корреляции (r), но тоже отрицательно связана с *dbh* и *TV*. Отрицательные значения r для *PBV* указывают на его уменьшение с увеличением *dbh* и *h*, что согласуется с другими исследованиями [8, 23].

Низкие значения r для *PBV* сделали бессмысленным непосредственное моделирование в зависимости от дендрометрических показателей стволов. *BSB*, *TV*, *BV* сильнее коррелируют с *dbh*, чем с *h*. В целом r рассматриваемых параметров для естественных порослевых древостоев оказались выше, чем для лесных культур. Низкие коэффициенты корреляции *PBV* с другими рассматриваемыми параметрами объясняются его значительным варьированием при одних и тех же значениях *dbh* и *h*.

Таблица 2

Коэффициент корреляции и его значимость для параметров коры и дендрометрических показателей деревьев липы мелколистной

Correlation coefficient and its significance for bark characteristics and dendrometric parameters of small-leaved linden trees

Показатель	<i>dbh</i>	<i>h</i>	<i>TV</i>	<i>BSB</i>	<i>BV</i>	<i>PBV</i>
<i>dbh</i>	–	0,871 p<0,01	0,957 p<0,01	0,953 p<0,01	0,949 p<0,01	–0,567 p<0,01
<i>h</i>	0,746 p<0,01	–	0,757 p<0,01	0,807 p<0,01	0,775 p<0,01	–0,528 p<0,01
<i>TV</i>	0,946 p<0,01	0,728 p<0,01	–	0,957 p<0,01	0,978 p<0,01	–0,509 p<0,01
<i>BSB</i>	0,893 p<0,01	0,733 p<0,01	0,941 p<0,01	–	0,961 p<0,01	–0,481 p<0,01
<i>BV</i>	0,948 p<0,01	0,739 p<0,01	0,989 p<0,01	0,944 p<0,01	–	–0,422 p<0,01
<i>PBV</i>	–0,054 p = 0,65	0,020 p = 0,87	–0,069 p = 0,56	–0,029 p = 0,81	0,034 p = 0,77	–

Примечание: Естественные порослевые древостои – верхняя правая часть таблицы; искусственные древостои – нижняя левая часть.

Подобная вариация является следствием различия морфологических форм липы. Формирование толстой и грубой коры с переплетенными ребрами у основания стволов может быть очень разным даже в пределах одного древостоя. Особенно это различие проявляется при сравнении деревьев естественных порослевых древостоев с деревьями искусственных насаждений. В лесных культурах даже VIII класса возраста кора менее грубая, трещины и ребра выражены значительно слабее. В целом *PBV* имеет тенденцию к снижению с увеличением *dbh* для обоих типов насаждений.

Первым подходом к моделированию был регрессионный анализ методом наименьших квадратов. В табл. 3 представлены оценки коэффициентов регрессии, статистические данные относительно рассмотренных моделей (1)–(3) для каждого исследуемого показателя (*BSB*, *TV*, *BV*) и соответствующего типа насаждения. Из данных табл. 3 видно, что все три рассматриваемых уравнения показали достаточную эффективность при моделировании параметров *BSB*, *TV*, *BV* ($Adj.R^2 > 0,7$). Для обоих типов насаждений *BSB*, *TV*, *BV* с самыми высокими $Adj.R^2$, минимальными MAE и RMSE в случае независимой переменной dbh^2h были найдены для уравнения (3). Это определило выбор его как прогнозного для всех дальнейших расчетов.

Диаметр дерева является наиболее известным и широко используемым предиктором *BSB*, *TV*, *BV* [13, 14, 36]. Включение *h* в качестве дополнительного предиктора значительно улучшает соответствие моделей [11, 26]. Необходимо иметь в виду, что использование только *dbh* в качестве переменной для прогнозирования параметров *BSB*, *TV*, *BV* более удобно, так как измерить его легче и результаты получаются точнее, в то время как правильно измерить *h* растущего дерева часто бывает более сложно, возможны существенные погрешности.

Таблица 3

Параметры моделей и их статистическая оценка для уравнений (1)–(3)
Coefficients and statistical estimation of bark characteristics of small-leaved linden trees

Модель	Переменная	b_1	b_2	Adj.R ²	MAE	RMSE
<i>Биомасса коры стволов</i>						
Естественные порослевые древостои						
1	<i>dbh</i>	-15,82525	2,51418	0,908	5,342	7,069
	<i>dbh²h</i>	4,87584	0,00301	0,908	5,142	7,051
2	<i>dbh</i>	-9,23090	1,25077	0,921	4,657	6,559
	<i>dbh²h</i>	-13,79664	0,43480	0,905	5,486	7,167
3	<i>dbh</i>	0,88504	-0,01282	0,898	5,916	7,462
	<i>dbh²h</i>	202,05611	0,00554	0,936	3,476	5,869
Искусственные древостои						
1	<i>dbh</i>	-24,25907	2,89268	0,794	7,719	11,234
	<i>dbh²h</i>	-2,53218	0,00402	0,880	5,200	8,646
2	<i>dbh</i>	-14,79921	1,28635	0,816	7,086	10,694
	<i>dbh²h</i>	-21,96006	0,45431	0,838	7,080	9,964
3	<i>dbh</i>	1,05627	-0,01842	0,759	8,605	12,223
	<i>dbh²h</i>	230,79402	0,00186	0,892	4,253	8,146
<i>Объем стволов в коре</i>						
Естественные порослевые древостои						
1	<i>dbh</i>	-0,21949	0,02933	0,915	0,063	0,079
	<i>dbh²h</i>	0,01152	0,00004	0,982	0,023	0,036
2	<i>dbh</i>	-1,51356	0,21732	0,758	0,108	0,134
	<i>dbh²h</i>	-1,57104	0,07627	0,705	0,119	0,147
3	<i>dbh</i>	97,35731	-1,75289	0,946	0,050	0,063
	<i>dbh²h</i>	24689,41695	0,12087	0,984	0,020	0,034
Искусственные древостои						
1	<i>dbh</i>	-0,25756	0,02972	0,894	0,060	0,078
	<i>dbh²h</i>	0,07850	0,00002	0,858	0,065	0,091
2	<i>dbh</i>	-1,64609	0,23199	0,750	0,092	0,120
	<i>dbh²h</i>	-1,78661	0,08612	0,738	0,097	0,123
3	<i>dbh</i>	116,93122	-2,25981	0,893	0,062	0,079
	<i>dbh²h</i>	23805,93399	0,11939	0,986	0,017	0,029

Окончание табл. 3

Модель	Переменная	b_1	b_2	Adj.R ²	MAE	RMSE
<i>Объем коры стволов</i>						
Естественные порослевые древостои						
1	<i>dbh</i>	-0,04224	0,00608	0,900	0,013	0,018
	<i>dbh</i> ² <i>h</i>	0,00599	0,00001	0,956	0,008	0,012
2	<i>dbh</i>	-1,12312	0,06387	0,723	0,023	0,030
	<i>dbh</i> ² <i>h</i>	-1,13963	0,02295	0,682	0,025	0,032
3	<i>dbh</i>	956,85355	-22,33157	0,701	0,025	0,033
	<i>dbh</i> ² <i>h</i>	109397,63190	0,93749	0,958	0,007	0,012
Искусственные древостои						
1	<i>dbh</i>	-0,05097	0,00601	0,897	0,012	0,016
	<i>dbh</i> ² <i>h</i>	-0,00559	0,00001	0,943	0,008	0,012
2	<i>dbh</i>	-1,15769	0,06932	0,720	0,020	0,026
	<i>dbh</i> ² <i>h</i>	-1,19567	0,02687	0,712	0,021	0,026
3	<i>dbh</i>	553,34037	-10,41931	0,887	0,014	0,016
	<i>dbh</i> ² <i>h</i>	114633,12424	0,79238	0,975	0,005	0,008

*Полужирным шрифтом выделен коэффициент со значимостью $p > 0,05$.

Наше исследование подтвердило, что совместное использование *dbh* и *h* в качестве предикторов обеспечивает наилучшее соответствие биомассы коры липы мелколистной для всех рассмотренных моделей. Такое же соответствие наблюдается для *TV* и *BV* при моделировании по уравнениям (1) и (3). Для уравнения (2) включение *h* в качестве дополнительного предиктора приводит к ухудшению качества моделирования: наблюдается снижение Adj.R², увеличение MAE и RMSE.

Предположение о существовании общей мультиколлинеарности факторов между сильно коррелирующими независимыми переменными *dbh* и *h* было подтверждено с помощью теста *FG*: 149 для естественных древостоев и 59 для искусственных – что превосходит показатели критического значения $\chi^2 = 3,8$. Мультиколлинеарность также была доказана получением *VIF* = 4,2 и *VIF* = 2,2 соответственно типам насаждений. Учитывая, что каждое из значений *VIF* для независимых переменных в регрессионной модели (3) лежит в пределах 1–5, мультиколлинеарность в данном случае не является проблемой.

Дополнительное включение в модели *BSB*, *TV*, *BV* таких независимых переменных (кроме *dbh* и *h*), как возраст дерева, длина и ширина кроны, ранговое положение дерева в древостое, возможно, могло бы улучшить качество их оценки. Однако это требует больших усилий, как при сборе полевых данных, так и при устранении мультиколлинеарности между сильно коррелирующими независимыми переменными.

Графический анализ остатков (здесь не приведен), расчет значений критерия *DW* по модели (3) для всех исследуемых параметров деревьев липы в естественных порослевых (кроме *BSB*) и искусственных древостоях выявили присутствие признаков автокорреляции остатков случайных отклонений.

Нелинейные модели, используемые в лесном хозяйстве для прогнозирования биомассы, объема ствола и коры, обычно демонстрируют гетероскедастичность, т. е. дисперсия ошибки не является постоянной для всех

наблюдений. Поэтому модели были проверены на гетероскедастичность. Тесты Бреуша–Пагана показали ее наличие для основных изученных параметров ($p = 0,05$), кроме *BSB* естественных порослевых и *BV* искусственных древостоев. Чтобы исключить влияние гетероскедастичности, параметры оценивают с помощью взвешенной регрессии [14, 26, 46]. Модели были снова проверены при помощи взвешенной регрессии. В табл. 4 приведены оценки параметров и соответствующие им ошибки модели (3) для исследуемых компонентов с использованием взвешенной регрессии. Параметры b_1 и b_2 признаны значимыми на уровне 5 %.

Таблица 4

Оценки параметров модели (3) для показателей естественных и искусственных древостоев, тесты значимости и статистика, полученные путем корректировок с использованием взвешенной регрессии

Estimates of model (3) characteristics for parameters of natural and artificial stands, tests of significance, and statistics obtained by adjustments using weighted regression

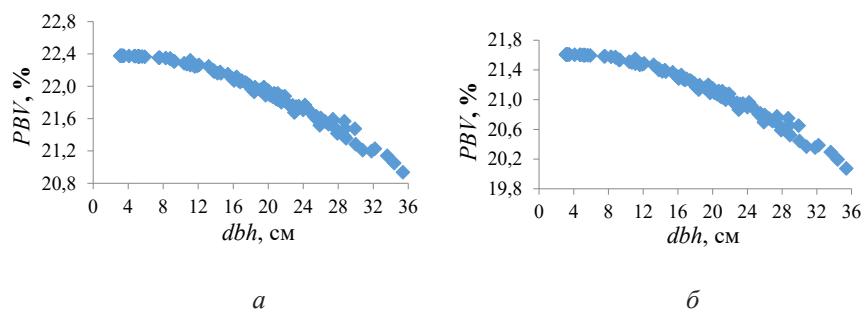
Показатель	q	Параметр модели	Значение	Стандартная ошибка	t	Adj.R ²	MAE	RMSE
Естественные порослевые древостои								
<i>BSB</i>	–	b_1	202,056	10,429	19,37	0,937	3,476	5,869
		b_2	0,006	0,001	8,66			
<i>TV</i>	1,781	b_1	24841,005	432,227	57,47	0,984	0,020	0,034
		b_2	0,113	0,031	3,65			
<i>BV</i>	1,487	b_1	110990,222	4172,242	26,60	0,958	0,007	0,012
		b_2	0,806	0,297	2,71			
Искусственные древостои								
<i>BSB</i>	2,011	b_1	210,496	8,644	24,35	0,890	4,645	8,219
		b_2	0,003	0,001	2,22			
<i>TV</i>	1,852	b_1	24774,460	491,07	50,45	0,986	0,017	0,028
		b_2	0,097	0,049	2,00			
<i>BV</i>	–	b_1	114633,124	4876,110	23,51	0,975	0,006	0,008
		b_2	0,792	0,260	3,05			

После внесения поправок на гетероскедастичность MAE и RMSE, а также скорректированный коэффициент детерминации практически не изменились или незначительно снизились. Соответствующие оценкам параметров b_1 и b_2 стандартные ошибки модели (3) для каждого компонента уменьшились, повысилась значимость самих параметров ($p < 0,05$), что подтверждает эффективность модели для оценки *BSB*, *TV*, *BV*.

Коэффициенты b_1 и b_2 моделей *BSB*, *TV*, *BV* различаются в зависимости от типа насаждений. Несмотря на то, что среднеквадратическое отклонение для *BSB* составило 7,3 %, а для *TV* (1,0 %) и *BV* (3,0 %) – меньше 5 %, попарное сравнение их прогнозных показателей подтвердило статистически значимое различие ($p < 0,05$). Это свидетельствует о важности моделирования *BSB*,

TV , BV отдельно для каждого типа насаждений. Необходимость отдельного моделирования для естественных порослевых и искусственных древостоев очевидна: они различаются по густоте и уровню конкуренции между соседними деревьями.

Предсказанные с помощью скорректированных уравнений TV и BV значения позволили рассчитать PBV для обоих типов насаждений (см. рисунок).



Выровненные значения доли объема коры деревьев липы мелколиственной в естественных порослевых (а) и искусственных насаждениях (б)

Leveled values of the proportion of the bark volume (PBV , %) of small-leaved linden trees in natural coppice stands (а) and artificial stands (б)

Полученные PBV показали более высокую изменчивость для естественных порослевых липняков, чем для искусственных. Это объясняется влиянием размера деревьев или их возраста. Прогнозируемые значения PBV при $dbh = 8$ см составляют соответственно 22,4 и 21,6 % для естественных порослевых и искусственных древостоев. При увеличении dbh до 36 см доля коры снижается соответственно до 20,9 и 20,1 %. Для экспериментально наблюдаемых показателей вариации PBV значительны (12–45 %), причем для небольших деревьев они выше, чем для деревьев большего размера.

Сравнение данных существующих сортиментных и товарных таблиц для равнинных лесов Предуралья с полученными нами данными свидетельствует о необходимости дальнейшего более детального изучения PBV деревьев липы мелколистной в различных по происхождению типах насаждений.

Заключение

Исследования роста и продуктивности деревьев липы мелколистной немногочисленны, исследования их биомассы и объема коры еще более ограничены. Основным способом получения таких данных является рубка деревьев, что сопряжено с большими затратами.

Среди трех уравнений, протестированных в данной работе, 3-е уравнение, в качестве независимых переменных в котором использованы диаметр деревьев на высоте 1,3 м и высота, показало лучшие статистические характеристики с точки зрения соответствия. Эта модель оценена при помощи метода взвешенных наименьших квадратов, с учетом присущих ошибок, гетероскедастичности и путем придания своей весовой функции естественным и искусственным древостоям. Модель рекомендуется для прогнозирования

биомассы и объема коры, объема стволов в коре деревьев липы мелколистной отдельно для естественных порослевых и искусственных древостоев ввиду их существенного различия между собой.

Так как смоделированные доли объема коры показали значительные отличия от применяемых в настоящее время производственно-нормативных данных, рекомендуются дополнительные исследования по валидации нашей модели с использованием новых, более крупных наборов данных, охватывающих более широкий диапазон различных лесных участков, стадий роста, полноты и происхождения насаждений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Габделхаков А.К., Рахматуллин З.З., Мартынова М.В., Фазлутдинов И.И., Муллагалеев И.А. Процент коры деревьев липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) по сортиментным таблицам // Рос. электрон. науч. журн. 2021. № 2(40). С. 121–130.

Gabdelkhakov A.K., Rakhmatullin Z.Z., Martynova M.V., Fazlutdinov I.I., Mullagalayev I.A. Percentage of Bark of Small-Leaved Linden (*Tilia cordata* Mill.) Trees According to Yield Tables. *Russian electronic scientific journal*, 2021, vol. 2(40), pp. 121–130. (In Russ.). <https://doi.org/10.31563/2308-9644-2021-40-2-121-130>

2. Орлова И.В., Филонова Е.С. Выбор экзогенных факторов в модель регрессии при мультиколлинеарности данных // Междунар. журн. прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 5, ч. 1. С. 108–116.

Orlova I.V., Filonova E.S. The Choice of Exogenous Factors in the Regression Model with Multicollinearity in the Data. *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2015, no. 5, part 1, pp. 108–116. (In Russ.).

3. Орловская Т.В., Гюльбякова Х.Н., Гужева Н.Н., Огурцов Ю.А. Изучение коры липы сердцелистной с целью создания новых лекарственных средств // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 2. С. 427. Режим доступа: <https://science-education.ru/article/view?id=8561> (дата обращения: 31.03.22).

Orlovskaya T.V., Gulbjakova C.N., Gujva N.N., Ogurtcov Y.A. Studying the *Tilia cordata* L. Bark with the Purpose of Creation of the New Medicines. *Modern problems of science and education*, 2013, no. 2, p. 427. (In Russ.).

4. Хасанова З.Ф. Лесные промыслы башкир Инзерского бассейна (конец XIX в. – начало XXI в.) // История, археология и этнография Кавказа. 2018. Т. 14, № 1. С. 105–112.

Hasanova Z.F. Forest Works of the Bashkir of the Inzerian Basin (End of the 19th – the Beginning of the 21st Centuries). *History, Archeology and Ethnography of the Caucasus*, 2018, vol. 14, no. 1, pp. 105–112. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2618-6772-2018-10113>

5. Akintunde M.O., Olawale A.O., Amusan A.S., Azeez A.I.A. Comparing Two Classical Methods of Detecting Multicollinearity in Financial and Economic Time Series Data. *International Journal of Applied Mathematics and Theoretical Physics*, 2021, vol. 7, no. 3, pp. 62–67. <https://doi.org/10.11648/j.ijamtp.20210703.11>

6. Avila A.L., Albrecht A. *Alternative Baumarten im Klimawandel: Artensteckbriefe – eine Stoffsammlung*. Baden-Württemberg, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt (FVA), 2018. 123 p. (In Ger.). Available at: <https://www.fva-bw.de/fileadmin/publikationen/sonstiges/180201steckbrief.pdf> (accessed 31.03.22).

7. Bauer R., Billard A., Mothe F., Longuetaud F., Houballah M., Bouvet A., Cuny H., Colin A., Colin F. Modelling Bark Volume for Six Commercially Important Tree Species in France: Assessment of Models and Application at Regional Scale. *Annals of Forest Science*, 2021, vol. 78, art. 104. <https://doi.org/10.1007/s13595-021-01096-7>

8. Bijak S., Bronisz A., Bronisz K., Tomusiak R., Wojtan R., Baran P., Czemieli T., Zasada M. Models to Estimate the Bark Volume for *Larix* sp. in Poland. *Environmental Sciences Proceedings*, 2021, vol. 3, iss. 1, art. 71. <https://doi.org/10.3390/IECF2020-07915>
9. Božić M., Čavlović J., Vedriš M., Jazbec M. Modeling Bark Thickness of Silver Fir Trees (*Abies alba* Mill.). *Šumarski list*, 2007, vol. 131, no. 1-2, pp. 3–12. (In Croat.). <https://doi.org/10.31298/sl>
10. Breusch T.S., Pagan A.R. A Simple Test for Heteroscedasticity and Random Coefficient Variation. *Econometrica*, 1979, vol. 47, no. 5, pp. 1287–1294. <https://doi.org/10.2307/1911963>
11. Canga E., Diéguez-Aranda U., Elias A.K., Cámara A. Above-Ground Biomass Equations for *Pinus radiata* D. Don in Asturias. *Forest Systems*, 2013, vol. 22, no. 3, pp. 408–415. <https://doi.org/10.5424/fs/2013223-04143>
12. Cellini J.M., Galarza M., Burns S.L., Martinez-Pastur G.J., Lencinas M.V. Equations of Bark Thickness and Volume Profiles at Different Heights with Easy-Measurement Variables. *Forest Systems*, 2012, vol. 21, no. 1, pp. 23–30. <https://doi.org/10.5424/fs/2112211-01963>
13. Chen D., Huang X., Zhang S., Sun X. Biomass Modeling of Larch (*Larix* spp.) Plantations in China Based on the Mixed Model, Dummy Variable Model, and Bayesian Hierarchical Model. *Forests*, 2017, vol. 8, iss. 8, art. 268. <https://doi.org/10.3390/f8080268>
14. Diamantopoulou M.J., Özçelik R., Yavuz H. Tree-Bark Volume Prediction via Machine Learning: A Case Study Based on Black Alder's Tree-Bark Production. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, vol. 151, pp. 431–440. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.06.039>
15. Eaton E., Caudullo G., de Rigo D. *Tilia cordata*, *Tilia platyphyllos* and Other Limes in Europe: Distribution, Habitat, Usage and Threats. *European Atlas of Forest Tree Species*. Ed. by J. San-Miguel-Ayanz, D. de Rigo, G. Caudullo, T. Houston Durrant, A. Mauri. Luxembourg, Publications Office of the EU, 2016, pp. 184–185. Available at: https://forest.jrc.ec.europa.eu/media/atlas/Tilia_spp.pdf (accessed 31.03.22).
16. Guéguen F., Stille P., Lahd Geagea M., Boutin R. Atmospheric Pollution in an Urban Environment by Tree Bark Biomonitoring – Part I: Trace Element Analysis. *Chemosphere*, 2012, vol. 86, iss. 10, pp. 1013–1019. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.11.040>
17. Heath L.S., Hansen M., Smith J.E., Smith B.W., Miles P.D. Investigation into Calculating Tree Biomass and Carbon in the FIADB Using a Biomass Expansion Factor Approach. *Forest Inventory and Analysis (FIA) Symposium 2008*. Park City, UT, USDA, 2009. 26 p.
18. Hemery G., Spiecker H., Aldinger E., Kerr G., Collet C., Bell S. *COST Action E42: Growing Valuable Broadleaved Tree Species*. Final Report. 2008. 40 p.
19. Kim J.H. Multicollinearity and Misleading Statistical Results. *Korean Journal of Anesthesiology*, 2019, vol. 72(6), pp. 558–569. <https://doi.org/10.4097/kja.19087>
20. Kohnle U., Hein S., Sorensen F.C., Weiskittel A.R. Effects of Seed Source Origin on Bark Thickness of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) Growing in Southwestern Germany. *Canadian Journal of Forest Research*, 2012, no. 42(2), pp. 382–399. <https://doi.org/10.1139/X11-191>
21. Laasasenaho J., Melkas T., Aldén S. Modelling Bark Thickness of *Picea abies* with Taper Curves. *Forest Ecology and Management*, 2005, vol. 206, iss. 1-3, pp. 35–47. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.10.058>
22. Lestander T.A., Lundström A., Finell M. Assessment of Biomass Functions for Calculating Bark Proportions and Ash Contents of Refined Biomass Fuels Derived from Major Boreal Tree Species. *Canadian Journal of Forest Research*, 2012, vol. 42, no. 1, pp. 59–66. <https://doi.org/10.1139/x11-144>
23. Liepiņš J., Liepiņš K. Evaluation of Bark Volume of Four Tree Species in Latvia. *Research for Rural Development*, 2015, vol. 2, pp. 22–28.

24. Magalhães T.M. Effects of Site and Tree Size on Wood Density and Bark Properties of Lebombo Ironwood (*Androstachys johnsonii* Prain). *New Zealand Journal of Forestry Science*, 2021, vol. 51, art. 3. <https://doi.org/10.33494/nzjfs512021x32x>
25. Meng S., Jia Q., Liu Q., Zhou G., Wang H., Yu J. Aboveground Biomass Allocation and Additive Allometric Models for Natural *Larix gmelinii* in the Western Daxing'anling Mountains, Northeastern China. *Forests*, 2019, vol. 10, iss. 2, art. 150. <https://doi.org/10.3390/f10020150>
26. Meng S., Yang F., Hu S., Wang H., Wang H. Generic Additive Allometric Models and Biomass Allocation for Two Natural Oak Species in Northeastern China. *Forests*, 2021, vol. 12, iss. 6, art. 715. <https://doi.org/10.3390/f12060715>
27. Myking T., Hertzberg A., Skrøppa T. History, Manufacture and Properties of Lime Bast Cordage in Northern Europe. *Forestry*, 2005, vol. 78, iss. 1, pp. 65–71. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpi006>
28. Neumann M., Lawes M.J. Quantifying Carbon in Tree Bark: The Importance of Bark Morphology and Tree Size. *Methods in Ecology and Evolution*, 2021, no. 12, iss. 4, pp. 646–654. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13546>
29. Pásztor Z., Mohácsiné I.R., Gorbacheva G., Börcsök Z. The Utilization of Tree Bark. *BioResources*, 2016, vol. 11(3), pp. 7859–7888. <https://doi.org/10.15376/biores.11.3>
30. Radoglou K., Dobrowolska D., Spyroglou G., Nicolescu V.-N. A Review on the Ecology and Silviculture of Limes (*Tilia cordata* Mill., *Tilia platyphyllos* Scop. and *Tilia tomentosa* Moench.) in Europe. *Die BodenKultur*, 2009, vol. 60, no. 3, pp. 9–19.
31. Repola J. Biomass Equations for Scots Pine and Norway Spruce in Finland. *Silva Fennica*, 2009, vol. 43, no. 4, pp. 625–647. <https://doi.org/10.14214/sf.184>
32. Saint-Andre L., M'Bou A.T., Mabiala A., Mouvondy W., Jourdan C., Roupsard O., Deleporte P., Hamel O., Nouvellon Y. Age-Related Equations for Above- and Below-Ground Biomass of a *Eucalyptus* Hybrid in Congo. *Forest Ecology and Management*, 2005, vol. 205, iss. 1-3, pp. 199–214. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.10.006>
33. Samojlik T. Drzewo wielce użyteczne – historia lipy drobnolistnej (*Tilia cordata*) w Puszczy Białowieskiej. *Rocznik Dendrologiczny*, 2005, vol. 53, pp. 55–64. (In Pol.).
34. Schmidt O., Bußler H. Die Winterlinde als Lebensraum für Tierarten. *LWF Wissen*, 2016, no. 78, pp. 60–65. (In Ger.).
35. Sedmíková M., Löwe R., Jankovský M., Natov P., Linda R., Dvořák J. Estimation of Over- and Under-Bark Volume of Scots Pine Timber Produced by Harvesters. *Forests*, 2020, vol. 11, iss. 6, art. 626. <https://doi.org/10.3390/f11060626>
36. Sharma R.P., Bhandari S.K., BK R. Allometric Bark Biomass Model for *Daphne bholia* in the Mid-Hills of Nepal. *Mountain Research and Development*, 2017, vol. 37, no. 2, pp. 206–215. <https://doi.org/10.1659/mrd-journal-d-16-00052.1>
37. Sonmez T., Keles S., Tilki F. Effect of Aspect, Tree Age and Tree Diameter on Bark Thickness of *Picea orientalis*. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2007, vol. 22, iss. 3, pp. 193–197. <https://doi.org/10.1080/02827580701314716>
38. Stängle S.M., Sauter U.H., Dormann C.F. Comparison of Models for Estimating Bark Thickness of *Picea abies* in Southwest Germany: The Role of Tree, Stand, and Environmental Factors. *Annals of Forest Science*, 2017, vol. 74, art. 16. <https://doi.org/10.1007/s13595-016-0601-2>
39. Subedi M., Sharma R.P. Allometric Biomass Models for Bark of *Cinnamomum tamala* in Mid-Hill of Nepal. *Biomass and Bioenergy*, 2012, vol. 47, pp. 44–49.
40. Temesgen H., Affleck D., Poudel K., Gray A., Sessions J. A Review of the Challenges and Opportunities in Estimating Above Ground Forest Biomass Using Tree-Level Models. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2015, vol. 30, iss. 4, pp. 326–335. <https://doi.org/10.1080/02827581.2015.1012114>
41. Vacek S., Vacek Z., Ulbrichová I., Bulušek D., Prokůpková A., Král J., Vančura K. Biodiversity Dynamics of Differently Managed Lowland Forests Left to Spontaneous Development in Central Europe. *Austrian Journal of Forest Science*, 2019, vol. 136, iss. 3, pp. 249–281.

42. Vezzola L.C., Muttoni G., Merlini M., Rotiroti N., Pagliardini L., Hirt A.M., Pelfini M. Investigating Distribution Patterns of Airborne Magnetic Grains Trapped in Tree Barks in Milan, Italy: Insights for Pollution Mitigation Strategies. *Geophysical Journal International*, 2017, vol. 210, iss. 2, pp. 989–1000. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx232>

43. Wang X., Zhao D., Liu G., Yang C., Teskey R.O. Additive Tree Biomass Equations for *Betula platyphylla* Suk. Plantations in Northeast China. *Annals of Forest Science*, 2018, vol. 75, art. 60. <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0738-2>

44. Wehenkel C., Cruz-Cobos F., Carrillo A., Lujan-Soto J.E. Estimating Bark Volumes for 16 Native Tree Species on the Sierra Madre Occidental, Mexico. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2012, vol. 27, iss. 6, pp. 578–585. <https://doi.org/10.1080/02827581.2012.661453>

45. Wilhelmsson L., Arlinger J., Spångberg K., Lundqvist S.-O., Grahn T., Hedenberg Ö., Olsson L. Models for Predicting Wood Properties in Stems of *Picea abies* and *Pinus sylvestris* in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2002, vol. 17, iss. 4, pp. 330–350. <https://doi.org/10.1080/02827580260138080>

46. Zeng W.S., Tang S.Z. Bias Correction in Logarithmic Regression and Comparison with Weighted Regression for Nonlinear Models. *Nature Precedings*, 2011. 11 p. <https://doi.org/10.1038/npre.2011.6708.1>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Научная статья

УДК 630*232

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-5-37-46

Интродукция климатипов лиственницы европейской в зоне смешанных лесов

М.Д. Мерзленко¹, *д-р с.-х. наук, проф.*; *ResearcherID: J-1359-2016*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0887-3178>

П.Г. Мельник^{1,2}, *канд. с.-х. наук, доц., ст. науч. сотр.*; *ResearcherID: E-7644-2014*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2802-7614>

А.А. Коженкова³, *канд. с.-х. наук, доц., науч. сотр.*; *ResearcherID: AAN-2228-2021*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1518-7165>

¹Институт лесоведения РАН, ул. Советская, д. 21, с. Успенское, Московская обл., Россия, 143030; md.merzlenko@mail.ru

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), ул. 1-я Институтская, д. 1, г. Мытищи, Московская обл., Россия, 141005; melnik_petr@bk.ru

³Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН, ул. Ботаническая, д. 4, Москва, Россия, 127276; kozhenkova_anna@mail.ru

Поступила в редакцию 21.10.20 / Одобрена после рецензирования 30.01.21 / Принята к печати 31.01.21

Аннотация. Ареал лиственницы европейской (*Larix decidua* Mill.) охватывает Среднюю Европу, а в Подмоскowie этот вид произрастает вне своей естественной области распространения. В посадках данная порода характеризуется быстрым ростом, устойчивостью, хорошими почвозащитными и водоохранными свойствами, а также высоким качеством древесины. Все виды лиственницы в Московском регионе положительно зарекомендовали себя с точки зрения высокой адаптивной способности, зачастую они продуктивнее местных хвойных лесообразующих пород. Аналогичные результаты получены лесоводами в Центральной и Восточной Европе: прирост по запасу в ряде польских популяций лиственницы в 50–60-летнем возрасте может достигать 10–15 м³/га в год, вот почему в этих странах широко используют данную древесную породу. Цель – изучение роста и производительности климатипов лиственницы европейской за границами ее естественного ареала. Исследованиями были охвачены опытные объекты интродукции лиственницы европейской, расположенные на территории центра Русской равнины в пределах Московского региона. Из всех климатипов лиственницы европейской, лиственница польская характеризуется самыми высокими показателями роста по высоте и диаметру, а также по накоплению стволового запаса. Она формирует насаждения с очень крупными стволами и отличается повышенной величиной почвенно-светового текущего прироста по диаметру стволов. По лесоводственному эффекту лиственница польская превосходит насаждения лиственницы европейской судетского происхождения. В итоге лиственница польская из всех рассмотренных провениенций обладает неоспоримыми преимуществами по скорости роста и накоплению запаса стволовой древесины, что является весомым аргументом в вопросе ее расширенной интродукции как перспективной хвойной породы для целевого лесовосстановления. Худшими показателями роста и продуктивности характеризуется лиственница европейская из Шотландии. Однако

в целом все климатипы лиственницы европейской успешно адаптируются в условиях центра Русской равнины и по таксационным показателям превосходят все местные хвойные лесообразующие породы.

Ключевые слова: интродукция, лиственница европейская, климатип, провениенция, лесные культуры, биогруппы, рост лиственницы, лесоводственный эффект, Московская область, лиственница польская

Для цитирования: Мерзленко М.Д., Мельник П.Г., Коженкова А.А. Интродукция климатипов лиственницы европейской в зоне смешанных лесов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 5. С. 37–46. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-37-46>

Original article

Introduction of European Larch Climatypes in the Mixed Forest Zone

Mikhail D. Merzlenko¹, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [J-1359-2016](https://orcid.org/0000-0002-0887-3178),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0887-3178>

Petr G. Melnik^{1,2,✉}, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof., Senior Research Scientist;
ResearcherID: [E-7644-2014](https://orcid.org/0000-0002-2802-7614), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2802-7614>

Anna A. Kozhenkova³, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof., Research Scientist;
ResearcherID: [AAN-2228-2021](https://orcid.org/0000-0003-1518-7165), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1518-7165>

¹Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences, ul. Sovetskaya, 21, s. Uspenskoye, Moscow Region, 143030, Russian Federation; md.merzlenko@mail.ru

²Mytishchi Branch of Bauman Moscow State Technical University, ul. 1-ya Institutskaya, 1, Mytishchi, Moscow Region, 141005, Russian Federation; melnik_petr@bk.ru✉

³Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences, ul. Botanicheskaya, 4, Moscow, 127276, Russian Federation; kozhenkova_anna@mail.ru

Received on October 21, 2020 / Approved after reviewing on January 30, 2021 / Accepted on January 31, 2021

Abstract. The range of European larch (*Larix decidua* Mill.) covers Central Europe, while in Podmoskovie this species grows out of its natural distribution area. In plantings this species is known for its fast growth, stability, good soil and water protection properties, and high wood quality. All larch species in the Moscow region have a positive reputation in terms of high adaptability, they are often more productive than the local coniferous forest-forming species. Similar results were obtained by foresters in Central and Eastern Europe. The increment in stock in a number of Polish larch populations at the age of 50–60 years can reach 10–15 m³/ha per year, that is why this wood species is widely used in silvicultural practice in these countries. The research aims at studying the growth and productivity of European larch climatypes outside its natural habitat. The research covered experimental sites of European larch introduction located in the territory of the center of the Russian Plain within the Moscow region. Of all the European larch climatypes, the Polish larch has the highest growth rates in height and diameter, as well as in the accumulation of trunk stock. It forms stands with very large trunks and has an increased value of soil-light basic increment in diameter of the trunks. The Polish larch is superior to the European larch of Sudeten origin in terms of silvicultural effect. As a result, Polish larch has undeniable advantages among all the reviewed provenances in terms of growth rate and accumulation of trunk wood reserves, which is a strong argument in the issue of its expanded introduction as a promising conifer for target reforestation. European larch from Scotland has the worst growth and productivity. On the whole, all climatypes of



European larch successfully adapt to the conditions of the center of the Russian Plain and are superior to all local coniferous forest-forming species in terms of inventory characteristics.

Keywords: introduction, European larch, climatype, provenance, forest plantations, biogroups, larch growth, silvicultural effect, Moscow region, Polish larch

For citation: Merzlenko M.D., Melnik P.G., Kozhenkova A.A. Introduction of European Larch Climatypes in the Mixed Forest Zone. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 5, pp. 37–46. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-37-46>

Введение

Естественный ареал лиственницы европейской охватывает Среднюю Европу, а именно Альпийско-Карпатскую горную страну и прилегающие к ней с севера холмистые предгорья и равнины Польши [3]. В европейской части России естественно произрастает только лиственница Сукачева [12]. В Подмосковье, как и во всем центре Русской равнины, лиственница является интродуцентом. В посадках она характеризуется быстрым ростом, устойчивостью, хорошими почвозащитными и водоохранными свойствами, а также имеет высококачественную древесину [1, 2, 4, 5, 13, 16, 17, 20, 23, 29]. Прекрасные результаты возобновления лиственницы европейской за пределами естественного ареала [8, 28] говорят об устойчивости и жизнеспособности древесной породы в новых условиях, что особенно важно для пород-интродуцентов [18].

При интродукции почти все виды лиственницы в Московском регионе положительно зарекомендовали себя с точки зрения высокой адаптивной способности [11]. Зачастую они продуктивнее, чем местные хвойные лесобразующие породы. Для лесорастительных условий Центральной России по росту и производительности самые хорошие результаты получены в лесных культурах, созданных посадкой лиственницы европейской судетской формы (*Larix decidua* Mill. f. *Sudetica*), а также лиственницы польской (*L. decidua* Mill. subsp. *polonica* (Racib. ex Woycicky) Domin) [5, 10, 11, 14, 17, 19]. Аналогичные результаты получены в условиях Западного Полесья Украины: в средневозрастных, приспевающих и спелых наиболее высокопроизводительных насаждениях с участием *Larix decidua* преобладающими категориями являются полностью здоровые и относительно здоровые особи (около 90 %) [24]. Поэтому лесоводы Белоруссии широко используют эту древесную породу в лесокультурной практике. В 25-летнем возрасте лиственница польская по многим биометрическим показателям превосходит сосну обыкновенную и растет по Ib классу бонитета [21, 22]. Кроме того, лиственницы польская и судетская по лесоводственному эффекту оправдали себя и в географических посадках Западной Европы [30]. Высокая производительность лиственницы европейской установлена также и в географических культурах, заложенных в 1949–1966 гг. в районе Рогова (Польша): прирост по запасу в ряде польских популяций лиственницы в 50–60-летнем возрасте может достигать 10–15 м³/га в год [27].

Цель работы – охарактеризовать успешность роста и производительность климатипов лиственницы европейской за пределами ее естественного ареала в условиях Московского региона.

Объекты и методы исследования

Объекты исследования, представленные 9 участками (табл. 1), располагаются в лесорастительных условиях суборей в зоне смешанных лесов [7].

Работы выполнялись на территории Серебряноборского опытного лесничества Института лесоведения РАН (ИЛАН РАН), Бронницкого лесничества Московской области (БЛ), Лесной опытной дачи Российского государственного аграрного университета – МСХА им. К.А. Тимирязева (ЛОД) и Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина (ГБС РАН). Все объекты, кроме расположенных на территории ГБС РАН, – это географические лесные культуры с рядовой посадкой. Объекты ГБС РАН представляют собой биогруппы, созданные бессистемной посадкой саженцев.

Таблица 1

Сведения об объектах исследования
Information on research sites

Шифр объекта (№ ПП, образца)	Место нахождения объекта	Тип условий местопрорастания	Подвид, форма европейской лиственницы	Источник получения семенного материала
1	ИЛАН РАН, Московская область	B ₂	<i>L. decidua</i> Mill. subsp. <i>polonica</i> (Racib. ex Woycicky) Domin	Польша, г. Скаржиско
2	ИЛАН РАН, Московская область	B ₂	<i>L. decidua</i> Mill. f. <i>Sudetica</i>	Польша, Судеты
51	БЛ, Московская область	C ₃	<i>L. decidua</i> Mill. subsp. <i>polonica</i> (Racib. ex Woycicky) Domin	Польша, г. Скаржиско
52	БЛ, Московская область	C ₃	<i>L. decidua</i> Mill. subsp. <i>polonica</i> (Racib. ex Woycicky) Domin	Польша, Мала Виес
47	БЛ, Московская область	C ₃	<i>L. decidua</i> Mill. var. <i>scotica</i>	Великобритания, Carron Estate Drum
Р	ЛОД, г. Москва	C ₂₋₃	<i>L. decidua</i> Mill. subsp. <i>polonica</i> (Racib. ex Woycicky) Domin	Польша, г. Скаржиско
Н	ЛОД, г. Москва	C ₂₋₃	<i>L. decidua</i> Mill. var. <i>scotica</i>	Великобритания, Carron Estate Drum
80581	ГБС РАН, г. Москва	C ₂	<i>L. decidua</i> Mill. subsp. <i>polonica</i> (Racib. ex Woycicky) Domin	Польша, г. Курник
80580	ГБС РАН, г. Москва	C ₂	<i>L. decidua</i> Mill. f. <i>Sudetica</i>	Польша, г. Курник

Примечание: ПП – пробная площадь.

На опытных объектах выполняли инструментальную таксацию в соответствии с ОСТ 56-69-83. При подеревных перечетах у всех живых деревьев измеряли длину окружности ствола на высоте 1,3 м с точностью до 1 см, по величине которой рассчитывали диаметр. Высоту деревьев измеряли высотомером Блюме-Лейсса с точностью до 0,1 м.

Запас стволовой древесины, м³/га, находили по формуле

$$M = H_{\text{cp}} FG,$$

где H_{cp} – средняя высота насаждения, м; F – видовое число; G – сумма площадей сечения, м²/га.

Для тех объектов, на которых ранее уже производили перечет, был рассчитан почвенно-световой текущий прирост по диаметру, см/год, при помощи формулы

$$Z_d = \frac{da - da'}{a - a'},$$

где da – средний диаметр текущего замера; da' – средний диаметр предыдущего измерения; $a - a'$ – число лет между двумя замерами.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты перечислительной таксации свидетельствуют об очень высокой производительности всех климатипов лиственницы европейской (табл. 2). В этих посадках, как в лесных культурах, так и в крупных биогруппах на территории ГБС РАН, насаждения по росту соответствуют Ia и Ib классам бонитета. Лучшая сохранность деревьев зафиксирована на объектах ЛОД и ГБС РАН, где лиственница высаживалась с густотой около 1 тыс. экз./га. В ИЛАН РАН и БЛ, где густота рядовой посадки была в 4 раза выше, сохранность деревьев составила около 20 %.

Таблица 2

Таксационная характеристика лиственничных посадок Inventory characteristics of larch plantations

Шифр объекта	A	H_{cp}	D_{cp}	G	M	$V_{\text{ств}}$
<i>ИЛАН РАН, Московская область</i>						
1	68	26,0	31,3	64,4	812	0,97
2	68	28,6	28,9	54,6	753	0,91
<i>БЛ, Московская область</i>						
51	56	27,6	30,4	66,2	881	1,06
52	56	29,2	37,3	69,5	939	1,49
47	58	25,7	23,6	49,3	585	0,56
<i>ЛОД, г. Москва</i>						
Р	60	30,2	33,6	72,9	1052	1,28
Н	60	25,8	26,4	48,7	599	0,67
<i>ГБС РАН, г. Москва</i>						
80581	60	29,6	47,8	–	–	2,50
80580	60	28,5	33,7	–	–	1,23

Примечание: A – возраст, лет; D_{cp} – средний диаметр, см; $V_{\text{ств}}$ – средний объем ствола, м³.

На всех экспериментальных объектах лучшие показатели роста и максимальный запас древесины свойственны провениенциям лиственницы польской, а лиственница шотландского происхождения уступала не только лиственнице польской, но и климатипам судетского происхождения. В посадках лиственница польская формирует насаждения с более крупными диаметрами стволов, чем лиственница шотландская. Это особенно видно в географических посадках ЛОД (рис. 1).

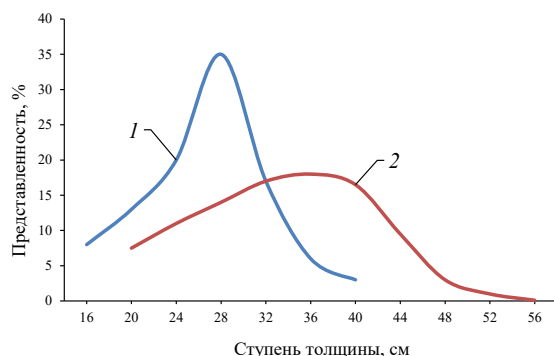


Рис. 1. Распределение деревьев лиственницы по ступеням толщины на опытных объектах ЛОД: 1 – лиственница шотландская на участке Н; 2 – лиственница польская на участке Р

Fig. 1. Distribution of larch trees by diameter classes at experimental sites of the Forest Experimental Dacha (FED): 1 – Scottish larch at the H site; 2 – Polish larch at the P site

Так, на объекте Р лиственница польская в лесных культурах, созданных, как и лиственница европейская шотландского происхождения, по одинаковой технологии и с одинаковой густотой посадки, в возрасте 60 лет представлена преимущественно более крупными стволами. Тогда как шотландская провениенция содержит большее количество маломерных стволов. У лиственницы польской даже отсутствуют деревья с диаметром менее 20 см. К преимуществу лесных культур лиственницы польской можно отнести наличие в ее искусственном насаждении деревьев с диаметром более 40 см (максимально – 52 см), которые полностью отсутствуют в посадке из лиственницы шотландского происхождения (объект Н). Именно за счет более крупных стволов лиственница польская на всех объектах имеет наибольший средний объем ствола.

Аналогичную картину можно наблюдать на опытных объектах в географических культурах БЛ (рис. 2). Как видно из этого рисунка, у лиственницы шотландской пик численности приходится на ступень толщины 20 см и сдвинут в сторону меньших значений, диапазон разбега диаметров от самой маленькой ступени к самой большой составил 36 см. У лиственницы польской пик численности лежит на более крупных ступенях – 28 и 32 см, кривая распределения приближается по форме к кривой нормального распределения, при этом четко просматривается наличие очень крупных стволов деревьев. Максимальная ступень толщины в 56-летних культурах лиственницы польской – 60 см, диапазон разбега диаметров на объекте 52 составляет 44 см, а на объекте 51 – 48 см.

Периодические замеры показали, что лиственница польская по сравнению с лиственницей европейской шотландского и судетского происхождений в Московском регионе на протяжении последних 7 вегетационных сезонов имела очень высокий почвенно-световой текущий прирост по диаметру ствола – до 0,65...0,67 см/год. Этот показатель был значительно меньшим у лиственницы шотландского и судетского происхождений – 0,27...0,41 см/год (рис. 3).

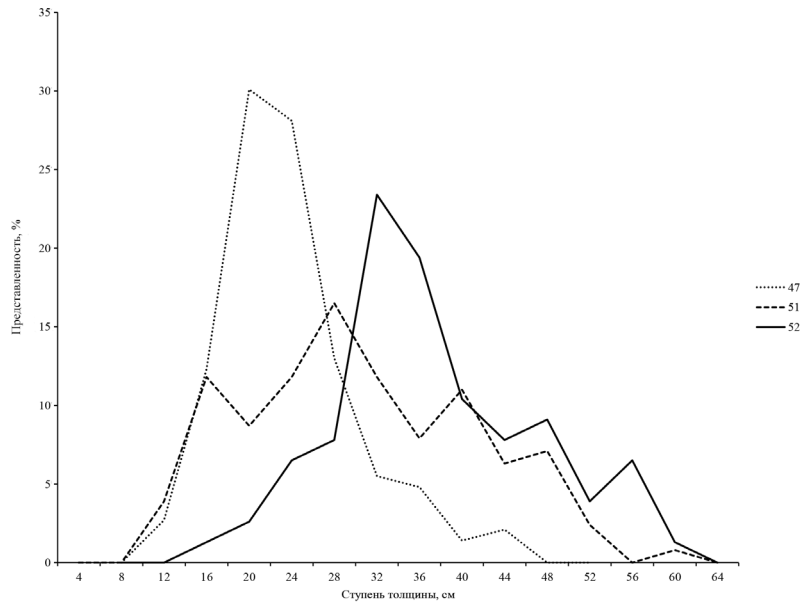
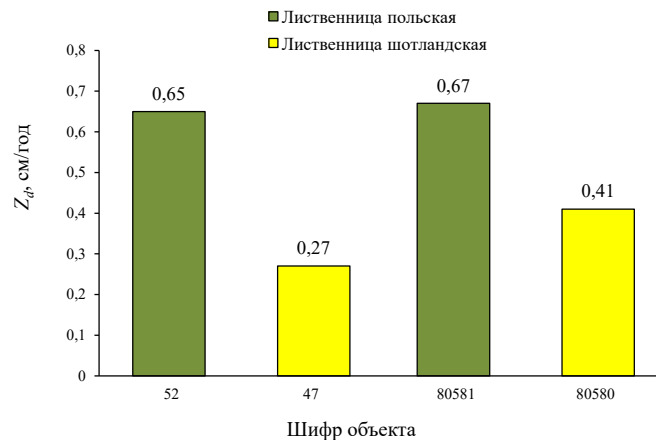


Рис. 2. Распределение деревьев лиственницы по ступеням толщины на опытных объектах БЛ: 47 – лиственница шотландская; 51 и 52 – лиственница польская

Fig. 2. Distribution of larch trees by diameter classes at experimental sites of the Bronnitsky Forestry (BF): 47 – Scottish larch; 51 and 52 – Polish larch

Рис. 3. Текущие приросты по диаметру на опытных объектах БЛ и ГБС РАН

Fig. 3. Current increments in diameter at the experimental sites of BF and the Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences (MBG RAS)



По запасу стволовой древесины все климатипы лиственницы европейской в лесных культурах обладают высокой производительностью, что неоднократно отмечалось во многих публикациях [5, 6, 20, 29, 30]. При этом лиственница польская имеет самый большой лесоводственный эффект, что видно и из данных настоящей работы. Показатели роста и накопления стволового запаса этой формы намного выше, чем у лиственницы европейской судетской формы, произрастающей в лесных культурах К.Ф. Тюрмера в Порецком лесничестве и в лесных культурах Готтетрея в Никольской лесной даче Московской области. Там даже в 100-летнем возрасте чистые по составу посадки лиственницы европейской судетской формы имели запас стволовой древесины 635 и 647 м³/га соответственно [10, 13].

Таким образом, в Московском регионе лиственница польская из всех климатипов наиболее полно реализует свой генетический потенциал. В настоящее время она выделяется систематиками как подвид лиственницы европейской, который генетически характеризуется меньшим полиморфизмом и большей общностью генофонда популяций [25–27]. Не исключено, что Московский регион является ее древней прародиной: в плейстоцене лиственница, согласно данным В.Н. Сукачева [15], росла на территории совпадающей с современным Подмосковьем, затем ледниками была вытеснена к западу и востоку. Из всех климатипов лиственницы ближе всего к Московскому региону – а это центр Русской равнины – произрастают лиственницы польская и Сукачева. Поэтому не удивительно, что последняя, представленная образцом из Сокольского района Ивановской области, дает высокие показатели роста и производительности в условиях Подмосковья [9].

Заключение

Лиственница польская из всех рассмотренных провениенций лиственницы европейской при ее интродукции в центр Русской равнины обладает неоспоримыми преимуществами по скорости роста и накоплению запаса стволовой древесины. Этим обуславливается реальность ее расширенной интродукции как перспективной хвойной породы для целевого искусственного лесовосстановления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Багаев С.С. К изучению климатипов лиственницы в условиях Южно-таежного района европейской части Российской Федерации // Лесхоз. информ. 2015. № 2. С. 35–45.
Bagaev S.S. The Studies of Larch Climatotypes in the Southern Taiga Raion of European Part of Russia. *Forestry information*, 2015, no. 2, pp. 35–45. (In Russ.).
2. Бессчетнов В.П., Бессчетнова Н.Н., Есичев А.О. Оценка физиологического состояния представителей рода лиственница (*Larix* Mill.) в условиях Нижегородской области // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 1. С. 9–17.
Besschetnov V.P., Besschetnova N.N., Esichev A.O. Physiological State Evaluation of Representatives of the Genus Larch (*Larix* Mill.) in the Nizhny Novgorod Region. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2018, no. 1, pp. 9–17. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.1.9>
3. Ирошников А.И. Лиственницы России. Биоразнообразие и селекция. М.: ВНИИЛМ, 2004. 182 с.
Iroshnikov A.I. *Larches of Russia. Biodiversity and Breeding*. Moscow, VNIILM Publ., 2004. 182 p. (In Russ.).
4. Исаченко Х.М. Опыт лесоразведения в центральных областях европейской части СССР. М; Л.: Гослесбумиздат, 1957. 112 с.
Isachenko Kh.M. *Forestation Experience in the Central Regions of the European Part of the USSR*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1957. 112 p. (In Russ.).
5. Карасев Н.Н. Повышение продуктивности лесов Подмосковья путем интродукции лиственницы: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М., 2009. 21 с.
Karasev N.N. *Increasing the Productivity of Forests in the Moscow Region through the Introduction of Larch*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Moscow, 2009. 21 p. (In Russ.).
6. Корешков Н.В., Царева Е.А. Географические культуры лиственницы. Санкт-Петербург: Научно-технологические технологии, 2021. 414 с.
Koreshkov N.V., Tsareva E.A. *Larch Provenance Trial Plantations*. Saint Petersburg, Naukoyemkiye tekhnologii Publ., 2021. 414 p. (In Russ.).

7. Курнаев С.Ф. Лесорастительное районирование СССР. М.: Наука, 1973. 203 с. Kurnaev S.F. *Forest-Growing Zoning of the USSR*. Moscow, Nauka Publ., 1973. 203 p. (In Russ.).

8. Мельник Л.П. Естественное возобновление лиственницы европейской за пределами ареала при минимальном количестве семенников // Лесн. вестн. 2021. Т. 25, № 6. С. 39–44.

Melnik L.P. Natural Regeneration of European Larch Outside Natural Area with Minimum of Seed Trees. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 6, pp. 39–44. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-6-39-44>

9. Мельник П.Г., Мерзленко М.Д., Лобова С.Л. Результат выращивания климатипов лиственницы в географических культурах северо-восточного Подмосковья // Вестн. Алтайск. ГАУ. 2016. № 2(136). С. 62–67.

Melnik P.G., Merzlenko M.D., Lobova S.L. The Results of Growing Larch Climatic Types in the Provenance Trial Plantations in the North-East of the Moscow Region. *Bulletin of Altai State Agricultural University*, 2016, no. 2(136), pp. 62–67. (In Russ.).

10. Мерзленко М.Д., Мельник П.Г. Опыт лесоводственного мониторинга в Никольской лесной даче. М.: МГУЛ, 2015. 112 с.

Merzlenko M.D., Melnik P.G. *Experience of Silvicultural Monitoring in Nicholskaya Lesnaya Dacha*. Moscow, MGUL Publ., 2015. 112 p. (In Russ.).

11. Мерзленко М.Д., Мельник П.Г., Коженкова А.А. Результаты выращивания климатипов лиственницы в географических культурах Западного Подмосковья // Вестн. Алтайск. ГАУ. 2018. № 1(159). С. 72–77.

Merzlenko M.D., Melnik P.G., Kozhenkova A.A. Growth Results of Larch Climotypes in Geographical Plantations of the Western Part of the Moscow Region. *Bulletin of Altai State Agricultural University*, 2018, no. 1(159), pp. 72–77. (In Russ.).

12. Наквасина Е.Н., Барабин А.И., Тихонов П.Р., Елисеев А.А. Лиственница на Архангельском Севере: биология, изменчивость, сохранение / под общ. ред. Е.Н. Наквасиной. Архангельск: АГТУ, 2008. 216 с.

Nakvasina E.N., Barabin A.I., Tikhonov P.R., Eliseev A.A. *Larch in the Arkhangelsk Region: Biology, Variability, and Conservation*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2008. 216 p. (In Russ.).

13. Поляков А.Н. Лесные культуры К.Ф. Тюрмера в Московской и Владимирской областях // Лесохоз. информ. 1995. № 4. С. 15–29.

Polyakov A.N. Forest Crops of K.F. Turmer in the Moscow and Vladimir Regions. *Forestry information*, 1995, no. 4, pp. 15–29. (In Russ.).

14. Рубцов М.В., Мерзленко М.Д. Лесные культуры К.Ф. Тюрмера: экспресс-информ. М.: ЦБНТИлесхоз, 1975. Вып. 14. 42 с.

Rubtsov M.V., Merzlenko M.D. *Forest Crops of K.F. Turmer*. Moscow, TsBNTIleskhoz Publ., 1975, iss. 14. 42 p. (In Russ.).

15. Сукачѳв В.Н. К истории развития лиственницы // Лесное дело: сб. ст. / под ред. М.Е. Ткаченко. М.; Л.: Нов. деревня, 1924. С. 12–44.

Sukachev V.N. On the History of the Development of Larch Trees. *Forestry: Collection of Papers*. Ed. by M.E. Tkachenko. Moscow, Novaya derevnya Publ., 1924, pp. 12–44. (In Russ.).

16. Тимофеев В.П. Лиственница в культуре. М.; Л.: Гослестехиздат, 1947. 296 с.

Timofeev V.P. *Larch in Plantation*. Moscow, Goslestekhizdat Publ., 1947. 296 p. (In Russ.).

17. Тимофеев В.П. Роль лиственницы в поднятии продуктивности лесов. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 160 с.

Timofeev V.P. *The Role of Larch in Raising the Forest Productivity*. Moscow, AN SSSR Publ., 1961. 160 p. (In Russ.).

18. Тимофеев В.П. Природа и насаждения Лесной опытной дачи Тимирязевской сельскохозяйственной академии за 100 лет. М.: Лесн. пром-сть, 1965. 168 с.

Timofeev V.P. *Nature and Plantations of the Forest Experimental Dacha of the Timiryazev Agricultural Academy for 100 years*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1965. 168 p. (In Russ.).

19. Тимофеев В.П. Опыт выращивания лиственницы европейской в Московской и соседних областях // Лесн. хоз-во. 1971. № 12. С. 21–27.

Timofeev V.P. The Experience of Growing European Larch in the Moscow and Neighboring Regions. *Lesnoye khozyaystvo*, 1971, no. 12, pp. 21–27. (In Russ.).

20. Тимофеев В.П. Лесные культуры лиственницы. М.: Лесн. пром-сть, 1977. 216 с. Timofeev V.P. *Forest Crops of Larch*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1977. 216 p. (In Russ.).

21. Тупик П.В., Ребко С.В. Селекция лиственницы европейской на семенную продуктивность // Тр. БГТУ. № 1. Лесн. хоз-во. 2015. № 1(174). С. 170–173.

Tupik P.V., Rebko S.V. Selection of European Larch for Seed Productivity. *Proceedings of BSTU*, 2015, no. 1(174), pp. 170–173. (In Russ.).

22. Штукин С.С., Волович П.И., Клыш А.С. Сохранность и продуктивность лесных культур лиственницы польской, созданных на раскорчеванной вырубке // Тр. БГТУ. № 1. Лесн. хоз-во. 2015. № 1(174). С. 107–110.

Shtukin S.S., Volovich P.I., Klysh A.S. Safety and Efficiency of Polish Larch Forest Cultures Created on the Uprooted Glade. *Proceedings of BSTU*, 2015, no. 1(174), pp. 107–110. (In Russ.).

23. Яблоков А.С. Культура лиственницы и уход за насаждениями. М.: Гослестехиздат, 1934. 128 с.

Yablokov A.S. *Larch Plantation and Care of Stands*. Moscow, Goslестekhizdat Publ., 1934. 128 p. (In Russ.).

24. Дебринюк Ю.М., Белеля С.О. Формова різноманітність і життєвий стан модрини у насадженнях Західного Полісся // Наукові праці Лісівничої академії наук України. 2016. Вип. 14. С. 117–125.

Debryniuk Yu., Beleya S. Variety of Forms and Vitality of the Larch in the Stands of Western Polissia. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 2016, iss. 14, pp. 117–125. (In Ukrainian).

25. Lewandowski A. *Modrzew polski (L. decidua Mill. subsp. polonica (Racib.) Domin): struktura genetyczna populacji oraz jego pochodzenie w swietle badan izoenzymowych*. Kornik, 1995. 72 p. (In Pol.).

26. Lewandowski A., Burczyk J. Mating System and Genetic in Natural Population of European Larch (*Larix decidua*) and Store Pine (*Pinus cembra*) Located at Higher Elevation. *Silvae Genetica*, 2000, vol. 49, no. 3, pp. 158–161.

27. Matras J. Badania proweniencyjne modrzewia prowadzone przez Instytut Badawczy Leśnictwa w latach 1948–2000. *Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa. Seria A*, 2001, no. 908-912, pp. 41–63. (In Pol.).

28. Melnik L.P. Dissemination and Natural Regeneration Dynamics of Larch in Nikolskaya Forest Estate. *56th Student's Scientific International Conference*. Slovak Republic, Technical University in Zvolen, 2015, pp. 1213–1223.

29. Melnik P.G., Karasyov N.N. Productivity of Different Larch Types in Moscow Region. *Eurasian Forests – Hungarian Forests: Materials of the VI International Conference of Young Scientists*. Moscow, MSUF Publ., 2006, pp. 83–85.

30. Schober R. Ergebnisse von Lärchen – Art Provenienzversuchen. *Silvae Genetica*, 1958, vol. 5, pp. 137–154. (In Ger.).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья

УДК 631.53

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-5-47-57

Семенное размножение видов рода *Spiraea* L. в условиях ботанического сада Уральского федерального университета

Р.В. Михалищев^{1✉}, *вед. инженер*; *ResearcherID*: [AEN-7411-2022](https://orcid.org/0000-0002-3035-2010),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3035-2010>

Т.Б. Сродных², *д-р с.-х. наук, проф.*; *ResearcherID*: [AAL-3149-2021](https://orcid.org/0000-0003-4297-0147),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4297-0147>

¹Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Ботанический сад, просп. Ленина, д. 51, г. Екатеринбург, Россия, 620083; rmichaliszczew@gmail.com[✉]

²Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; tanya.srodnykh@mail.ru

Поступила в редакцию 10.11.20 / Одобрена после рецензирования 20.02.21 / Принята к печати 22.02.21

Аннотация. Спиреи (*Spiraea* L.) широко применяются в ландшафтном дизайне, при этом число видов и культиваров спирей, используемых в озеленении Екатеринбурга, невелико. Информация о всхожести семян позволит разработать эффективные методы размножения растений в культуре для разных целей, в том числе для озеленения. Материалом исследований служили семена спирей, собранные в ботаническом саду Уральского федерального университета. За всхожестью семян наблюдали с 2015 по 2018 г. Изучение суточной динамики прорастания семян показало, что наиболее активно дают всходы семена 2 видов *S. salicifolia* L. и *S. humilis* Rojak. Семена этих спирей прорастали на 2-е сутки после посева. Семена других видов начинали прорастать только на 3-и сутки после посева. Высокой всхожестью характеризовались семена *S. salicifolia* (89,5–97,8 %) и таксономически близкой к ней *S. humilis* (77,0–96,3 %), а также *S. chamaedryfolia* (71,8–92,5 %) – полиморфного вида с широким ареалом в Евразии. Всхожесть семян других спирей варьировала в разные годы. Это может быть связано с более низким адаптационным потенциалом данных видов в условиях Среднего Урала. Возможно, для этих спирей экономически выгодным в производстве будет вегетативное размножение. Полевая всхожесть семян оказалась ниже лабораторной и у разных видов составляла от 12,5 до 24,5 %. При этом практически все спиреи в разной степени способны возобновляться естественным путем на территории ботанического сада. Избыточное увлажнение и низкие температуры в течение вегетационного периода и высокие средние температуры в зимний период оказывали отрицательное влияние на рост и развитие спирей, а следовательно, и на качество продуцируемых ими семян. Высота снежного покрова в марте имеет прямую связь с качеством семян, так как обеспечивает достаточный уровень влаги в почве в начале вегетационного периода.

Ключевые слова: семена спирей, *Spiraea* L., всхожесть, семеноводство, озеленение Екатеринбурга, влияние климатических факторов, качество семян

Благодарности: Исследования проведены при финансировании Министерством образования и науки РФ в рамках выполнения государственного задания УрФУ № FEUZ-2020-0057.



Для цитирования: Михалищев Р.В., Сродных Т.Б. Семенное размножение видов рода *Spiraea* L. в условиях ботанического сада Уральского федерального университета // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 5. С. 47–57. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-47-57>

Original article

Seed Propagation of *Spiraea* L. Species in the Botanical Garden of the Ural Federal University

Roman V. Mikhailishchev^{1✉}, *Leading Engineer; ResearcherID: [AEN-7411-2022](https://orcid.org/0000-0002-3035-2010)*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3035-2010>

Tatyana B. Srodnykh², *Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [AAL-3149-2021](https://orcid.org/0000-0003-4297-0147)*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4297-0147>

¹Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Botanical Garden, prosp. Lenina, 51, Yekaterinburg, 620083, Russian Federation; rmichaliszczew@gmail.com[✉]

²Ural State Forest Engineering University, ul. Sibirskiy trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; tanya.srodnykh@mail.ru

Received on November 10, 2020 / Approved after reviewing on February 20, 2021 / Accepted on February 22, 2021

Abstract. Spireas (*Spiraea* L.) are widely used in landscaping, while the number of spirea species and cultivars used in Yekaterinburg landscaping is small. Information concerning seed germination will enable the development of effective methods of plant propagation for various purposes, including landscaping. Spirea seeds collected in the botanical garden of the Ural Federal University served as research material. Seed germination was monitored from 2015 to 2018. The study of daily dynamics of seed germination showed that the most active sprouting seeds were the following: *S. salicifolia* L. and *S. humilis* Pojark. Seeds of these spireas germinated on the 2nd day after sowing. Seeds of other species began to germinate only on the 3rd day after sowing. The following seeds were highly germinative: *S. salicifolia* (89.5–97.8 %), taxonomically related to the previous species *S. humilis* (77.0–96.3 %), and a polymorphic species with a wide range in Eurasia *S. chamaedryfolia* (71.8–92.5 %). Seed germination of other spireas varied from year to year. This may be related to the lower adaptive potential of these species in the Middle Urals. Perhaps vegetative propagation will be economically useful for these species. The field germination was lower than laboratory germination (from 12.5 to 24.5 % for different species). At the same time, all spireas, except for *Spiraea ussuriensis*, are capable of regenerating naturally to some extent in the Botanical Garden. Excessive moistening and low temperatures during the growing season and high average winter temperatures had a negative effect on growth and development of spireas and, consequently, on the quality of seeds produced by them. The depth of snow cover in March has a direct correlation with seed quality, as it provides sufficient moisture in the soil at the beginning of the growing season.

Keywords: spirea seeds, *Spiraea* L., seed germination, seed production, landscaping, Yekaterinburg, influence of climatic factors, germinative quality

Acknowledgements: The research was carried out with the funding provided by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation as part of the state assignment of the Ural Federal University No. FEUZ-2020-0057.

For citation: Mikhailishchev R.V., Srodnykh T.B. Seed Propagation of *Spiraea* L. Species in the Botanical Garden of the Ural Federal University. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 5, pp. 47–57. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-47-57>



Введение

Род *Spiraea* L. принадлежит к подсемейству *Spireoideae* Agardh. семейства *Rosaceae* Juss. [19] и насчитывает по разным данным от 50–80 до 90–100 видов, распространенных в умеренной зоне северного полушария и в горных регионах субтропиков, наибольшее видовое разнообразие – в Восточной Азии [6, 18, 20]. На Урале естественно произрастают 4 вида спиреи [8], а на территории Свердловской области – 2 вида [5]. Спиреи широко применяются в ландшафтном дизайне. Это высокодекоративные кустарники высотой от 0,5 до 2 м, пригодные для создания куртин, групповых посадок, нестриженных живых изгородей. Низкорослые формы и сорта спиреи можно использовать в бордюрах. Наиболее теневыносливые виды применимы в подлеске, в негустых группах деревьев с ажурными кронами. Спиреи цветут в разное время и подбором видов можно достигнуть почти непрерывного их цветения в течение всего вегетационного периода [1]. *Spiraea japonica* L. f., *S. nipponica* Maxim. и *S. betulifolia* Pall. относительно устойчивы к засолению почвы [23].

Спиреи могут служить сырьем для фармацевтической промышленности. В листьях и соцветиях спирей содержатся фенольные соединения. Экстракты листьев и соцветий обладают антиоксидантной активностью [17, 21]. Для семян некоторых видов спирей также отмечается антиоксидантная и противомикробная активность [15]. Некоторые виды спирей используют при мелиорации и рекультивации для восстановления нарушенных земель [22].

Число видов спирей в зеленых насаждениях Екатеринбурга невелико, преимущественно это спиреи иволистная (*S. salicifolia* L.), средняя (*S. media* Schmidt.), дубравколистная (*S. chamaedryfolia* L.) и японская (*S. japonica* L. f.) [3], а также ее садовые формы [2]. В последние годы применение спирей в озеленении Екатеринбурга возросло, однако, это по-прежнему единичные небольшие по площади посадки вблизи коммерческих объектов.

Один из способов быстрого и массового размножения растений – посев семян, позволяющий за короткое время получить большое число посадочного материала. При этом нужно учитывать, что спиреи, произрастая совместно в культуре, часто образуют гибриды [8], что затрудняет получение из семян растений с исходными признаками. Хотя это свойство спирей может быть использовано в селекции для получения новых декоративных форм.

Важным показателем успешной акклиматизации является формирование растениями полноценных семян. Проводившиеся ранее на Среднем Урале работы по интродукции спирей показали, что у части исследуемых видов семена не завязывались или не вызревали, например, у *S. japonica* L. f. и *S. japonica* f. *albiflora* (Miq.) Kitam [7]. Семена спирей имеют незатрудненный тип прорастания. Физиологический покой у них отсутствует или проявляется как неглубокий и снимается после 3–6 месяцев сухого хранения [11]. Хранение семян при температуре 5 °C оказывает положительный эффект на всхожесть [13]. Она остается высокой при хранении в течение 2–3 лет [8, 11]. Оптимальная температура для прорастания семян составляет около 30 °C. Для семян не требуется стратификация. Однако отмечается, что она увеличивает всхожесть семян некоторых видов спирей, при этом продолжительная стратификация может приводить к снижению всхожести [10, 16].

Исследование всхожести и факторов, оказывающих влияние на качество семян, позволит разработать эффективные методы размножения спирей в условиях Среднего Урала и иметь местный посадочный материал для озеленения.

Цель работы – изучить всхожесть семян различных видов спирей и влияние на нее климатических факторов.

Объекты и методы исследования

Исследования проводили в ботаническом саду Уральского федерального университета. Ботанический сад находится на юго-восточной окраине г. Екатеринбурга, на территории лесопарка имени Лесоводов России. Екатеринбург расположен в подзоне южной тайги. Наиболее холодным месяцем является январь со средней температурой $-12,6$ °С, а самым теплым – июль со средней температурой $19,0$ °С, среднегодовая температура – $2,5$ °С. Среднегодовая сумма осадков – 539 мм. Наибольшее количество осадков выпадает в теплый период года, наименьшее – в зимний с минимумом в феврале. Высота снежного покрова достигает максимума в марте и составляет около 80 см. Безморозный период – 104 дн. Коэффициент увлажнения колеблется от $1,2$ до $1,6$. На основании средних многолетних данных увлажнение в вегетационный период считается достаточным, максимум осадков приходится на июнь–август. Таким образом, для района интродукции характерны продолжительная зима и короткое лето [12].

Материалом исследований служили семена *S. salicifolia* L., *S. humilis* Pojark., *S. betulifolia* Pall., *S. japonica* f. *albiflora* (Miq.) Kitam., *S. japonica* cv. *Little Princess*, *S. chamaedryfolia* L., *S. ussuriensis* Pojark., собранные в 2015–2018 гг. (табл. 1).

Таблица 1

Происхождение коллекционных растений Origin of collection plants

Вид	Источник поступления в коллекцию, год	Характер поступившего материала
<i>Spiraea salicifolia</i> L.	Ботанический сад Коми УНЦ РАН, Сыктывкар, 2008	Семена
<i>S. humilis</i> Pojark.	Ботанический сад ПГТУ, Йошкар-Ола, 2004	Семена
<i>S. betulifolia</i> Pall.	Неизвестного происхождения, 1995	Растения
<i>S. japonica</i> f. <i>albiflora</i> (Miq.) Kitam	Репродукция, Ботанический сад УрФУ, 2006	Семена
<i>S. japonica</i> cv. <i>Little Princess</i>	Коммерческий питомник, Екатеринбург, 2011	Растения
<i>S. chamaedryfolia</i> L.	Неизвестного происхождения, 1995	Растения
<i>S. ussuriensis</i> Pojark.	Ботанический сад ПГТУ, Йошкар-Ола, 2006	Семена

Семена собирали после полного созревания плодов и хранили в сухом состоянии в бумажных пакетах при постоянной температуре 5 °С в течение 7 мес. Всхожесть семян устанавливали с 2015 по 2018 г. Определение лабораторной всхожести проводили по ГОСТ 13056.6–97 перед весенним посевом. Семена проращивали в чашках Петри на влажной фильтровальной бумаге в 4-кратной повторности по 100 шт. при температуре 25 °С на свету. Подсчет всходов проводили на 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15 и 20-е сутки. Проращивание семян прекращали после окончания появления новых всходов. Полевую всхожесть определяли посевом семян в ящики с грунтом в 4-кратной повторности по 100 шт. По семенам урожая 2017 и 2018 гг. изучали суточную динамику прорастания семян.

Метеопараметры рассчитывали на основе данных городской метеостанции, размещенных на ресурсе https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Екатеринбурге. Гидротермический коэффициент увлажнения находили по формуле Г.Т. Селянинова:

$$\text{ГТК} = (\Sigma r \cdot 10) / \Sigma t,$$

где Σr – сумма осадков за период с температурами выше 10 °С; Σt – сумма среднесуточных активных температур выше 10 °С.

При анализе полученных данных вычисляли среднее арифметическое, стандартные отклонения и ошибки среднего арифметического. Для оценки влияния погодных условий года и видовых особенностей на лабораторную всхожесть семян использовали двухфакторный дисперсионный анализ с повторностями [4]. Для определения основных метеопараметров, влияющих на качество семян, – факторный анализ. Данные обрабатывали при помощи программ Excel и Statistica 13.

Результаты исследования и их обсуждение

Ежегодно формируют всхожие семена только 4 из изученных видов спирей. Высокой всхожестью во все годы исследований отличались семена спирей иволистной (табл. 2): лабораторная всхожесть – от 89,5 до 97,8 %. Из других видов ежегодно качественные семена формируют спирей низкая (77,0–96,3 %) и дубравколистная (71,8–92,5 %). Достаточно высокая всхожесть семян этих спирей отмечена и в других интродукционных пунктах [9, 11]. Отсюда возможен вывод о широких адаптационных возможностях данных видов.

В ранних работах, проводившихся на Урале, отмечалось, что семена *S. japonica* f. *albiflora* (Miq.) Kitam не вызревают [7]. Проведенные нами исследования показали, семена белоцветковой формы спирей японской вызревают ежегодно, однако значительно отличаются по всхожести в разные годы – от 20,5 до 86,5 %. Вероятно, это связано с некоторым улучшением условий произрастания для данной разновидности при интродукции под влиянием потепления климата.

У остальных видов семена в отдельные годы оказались невосхожими либо плодоношение было слабым. Так, в 2017 и 2018 гг. спирей березолистная дала семена в количестве, недостаточном для анализа, а всхожесть семян 2015 и 2016 гг. составила соответственно 24,5 и 81,3 %. Спирей березолистная представлена в коллекции экземплярами, выращенными из черенков, что, вероятно, снижает семенную продуктивность, так как для спирей характерно ингибирование собственной пыльцы, препятствующее самоопылению [14]. Семена *S. japonica* cv. *Little Princess* и *S. ussuriensis* в 2015 г. оказались невосхожими, в остальные годы всхожесть была от 41,5 до 94,0 % и от 32,5 до 84,5 % соответственно.

Таблица 2

Всхожесть семян при проращивании в лабораторных условиях, %
Seed germination in laboratory conditions, %

Вид	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	Среднее
<i>Spirea salicifolia</i> L.	90,0 ± 2,7	95,3 ± 1,1	89,5 ± 4,1	97,8 ± 0,5	93,1 ± 1,7
<i>S. humilis</i> Pojark.	77,0 ± 3,1	96,3 ± 1,1	92,8 ± 2,1	95,5 ± 2,1	90,4 ± 2,6
<i>S. betulifolia</i> Pall.	24,5 ± 1,0	81,3 ± 3,2	–	–	52,9 ± 10,8
<i>S. japonica</i> f. <i>albiflora</i> (Miq.) Kitam.	38,0 ± 1,7	86,5 ± 1,3	20,5 ± 3,2	80,0 ± 2,8	56,3 ± 8,4
<i>S. japonica</i> cv. <i>Little Princess</i>	–	83,5 ± 2,1	41,5 ± 3,5	94,0 ± 1,5	73,0 ± 8,2
<i>S. chamaedryfolia</i> L.	71,8 ± 1,9	72,0 ± 2,7	92,0 ± 1,2	92,5 ± 1,0	82,1 ± 3,2
<i>S. ussuriensis</i> Pojark.	–	50,8 ± 3,4	32,5 ± 4,0	84,5 ± 2,3	55,9 ± 4,2

Спиреи с длительным периодом цветения, в частности летнецветущие виды, образуют больше качественных семян [11]. Дисперсионным анализом показано влияние продолжительности цветения на всхожесть семян ($F = 30,08$; $p = 0,000$). Например, в условиях ботанического сада спирея уссурийская цветет $18,6 \pm 2,4$ дн. в мае, что заметно меньше, чем у других видов спирей. Это может влиять на качество и количество завязавшихся семян, в особенности когда цветение приходится на период холодной погоды, так как спиреи являются насекомоопыляемыми растениями, а в данное время опылители малоактивны.

Дисперсионный анализ выявил влияние видовых особенностей ($F = 4,59$; $p = 0,005$) и погодных условий в год формирования семян ($F = 4,26$; $p = 0,019$) на лабораторную всхожесть. Во время проведения исследований вегетационные периоды отличались по температуре и влагообеспеченности от среднесезонных данных. Так, 2015 и 2017 гг. характеризовались избыточным увлажнением (ГТК составил 2,0 и 1,5 соответственно), 2016 г. был засушливым (ГТК = 0,7), а увлажнение в 2018 г. находилось в пределах нормы (ГТК = 1,2).

Корреляционный анализ показал отрицательную связь лабораторной всхожести с ГТК за период до массового созревания семян ($r = -0,4827$, $p = 0,000$), следовательно, в годы с высоким ГТК спиреи формируют семена с более низкой всхожестью. Отрицательные корреляции обнаружены между всхожестью и суммой осадков с января до начала созревания семян ($r = -0,4085$, $p = 0,000$); всхожестью и средней температурой за январь–март ($r = -0,4565$, $p = 0,000$). Положительные корреляционные связи установлены между всхожестью и высотой снежного покрова в марте ($r = 0,4188$, $p = 0,000$), а также с суммами положительных температур выше 0 ($r = 0,2942$, $p = 0,004$), 5 ($r = 0,3224$, $p = 0,001$) и 10 °С ($r = 0,3229$, $p = 0,001$).

Таким образом, избыточное увлажнение и низкие температуры в течение вегетационного периода, а также высокие средние температуры в зимний период (что, вероятно, связано с оттепелями) оказывают отрицательное влияние на рост и развитие спирей и, следовательно, на качество продуцируемых ими семян. Высота снежного покрова в марте имеет прямую связь с качеством семян, так как обеспечивает достаточный уровень влаги в почве в начале вегетационного периода.

Для определения влияния метеопараметров на всхожесть был проведен факторный анализ (табл. 3). Большинство параметров, связанных с температурой и режимом увлажнения в течение вегетационного периода, объединились в 1-й фактор, следовательно, на всхожесть семян спирей они оказывают влияние в комплексе. Во 2-й фактор выделилась средняя температура за январь–март, т. е. условия перезимовки растений.

Таблица 3

**Факторные нагрузки на всхожесть семян *Spiraea* L.
Factor loadings on the seed germination of *Spiraea* L.**

Метеопараметр	Фактор 1	Фактор 2
Сумма температур выше, °C: 0	-0,848690	-0,383555
5	-0,884978	-0,343532
10	-0,864674	-0,407190
Сумма осадков с января до начала созревания семян, мм	0,750770	-0,500505
ГТК за период до массового созревания семян	0,879949	-0,436263
Средняя температура воздуха за январь–март, °C	0,143594	-0,852187
Высота снежного покрова, см: в январе	-0,363029	-0,588492
в марте	-0,877821	0,356841
Вклад фактора	4,512067	2,071645
Сумма факторной дисперсии, %	56,4008	25,8956

Примечание: Полу жирным шрифтом выделены значимые нагрузки, >0,7.

Изучение динамики прорастания семян спирей урожая 2017 и 2018 гг. в лабораторных условиях показало, что наиболее высокие темпы прорастания семян характерны для *S. salicifolia* и близкой к ней дальневосточной *S. humilis*. Для остальных видов отмечены более низкие темпы прорастания семян (рис. 1). Семена спирей иволистной начинали прорастать на 1-е или 2-е сутки после посева в зависимости от года формирования, а семена спирей низкой – на 2-е сутки.

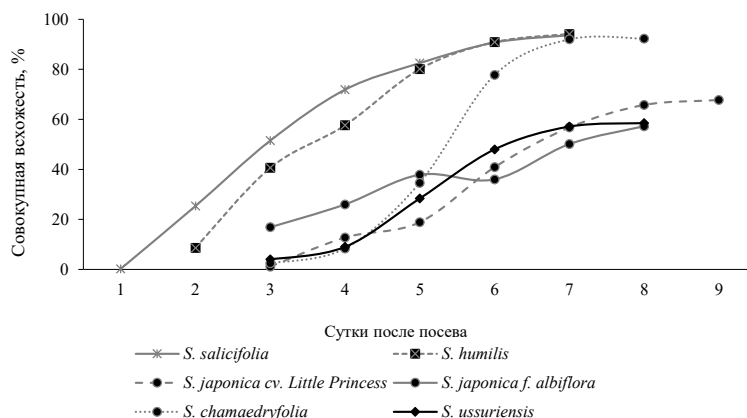


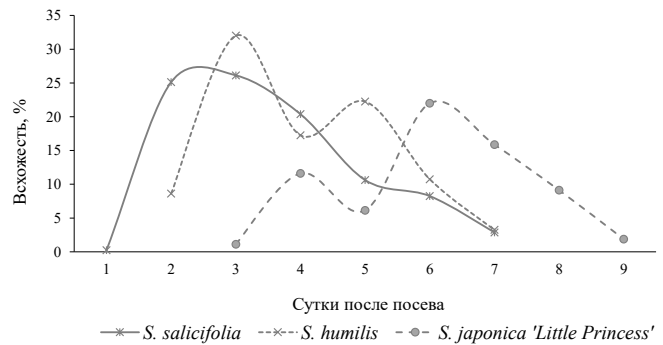
Рис. 1. Совокупная всхожесть семян спирей (среднее за 2017–2018 гг.)

Fig. 1. Cumulative germination of spirea seeds (average for 2017–2018)

У спирей иволистной и низкой наибольшее количество проросших семян наблюдалось на 3-и сутки (рис. 2), появление новых всходов заканчивалось через 9–10 дн. прорастивания.

Рис. 2. Динамика прорастания семян *S. salicifolia*, *S. humilis*, *S. japonica* cv. *Little Princess* (среднее за 2017–2018 гг.)

Fig. 2. Dynamics of seed germination of *S. salicifolia*, *S. humilis* and *S. japonica* cv. *Little Princess* (average for 2017–2018)



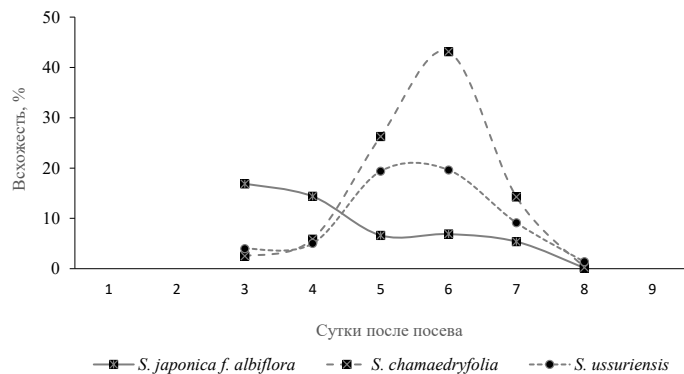
Семена других видов спирей характеризовались более длительным периодом появления всходов. Наиболее длительным временем прорастания отличались семена *S. japonica* cv. *Little Princess*. Они начинали прорастать на 3-и сутки после посева с максимальным числом проросших семян на 7-е сутки, а общая продолжительность появления новых всходов составила 17 дн. (рис. 2).

Кривые динамики появления всходов у *S. humilis* и *S. japonica* cv. *Little Princess* имели два пика (рис. 2). Возможно, это связано с тем, что данные виды более «чувствительны» к влиянию погодных условий при интродукции.

Для семян *S. ussuriensis* и *S. chamaedryfolia* наибольшее число всходов отмечалось на 7-е сутки после посадки, а прорастание семян начиналось на 3–5-е сутки в зависимости от года созревания семян. Появление новых всходов продолжалось в течение 12 дн. (рис. 3). Прорастание семян у *S. japonica* f. *albiflora* начиналось на 3-и сутки, тогда же наблюдался и максимум проросших семян (рис. 3). Общая продолжительность появления новых всходов составляла 12–13 дн.

Рис. 3. Динамика прорастания семян *S. albiflora*, *S. chamaedryfolia*, *S. ussuriensis* (среднее за 2017–2018 гг.)

Fig. 3. Dynamics of seed germination of *S. albiflora*, *S. chamaedryfolia* and *S. ussuriensis* (average for 2017–2018)



Таким образом, наибольшая скорость и энергия прорастания семян были отмечены для спирей иволистной и низкой. Для этих же видов характерен и наименьший период появления новых всходов.

При посеве семян 2016 г. сбора в грунт весной 2017 г. полевая всхожесть семян была ниже лабораторной и у разных видов составила от 12,5 до 24,5 %. У спиреи иволистной наблюдалась наибольшая полевая всхожесть – 24,5 %, у дубравколистной – 20,3 %, у остальных видов – от 16,3 до 19,8 %. Наименьшая полевая всхожесть обнаружена у семян спиреи уссурийской – 12,5 %. Возможно, такая низкая всхожесть при посеве в грунт по сравнению с лабораторной связана с мелкими размерами семян спирей, которые могут легко повреждаться в почве при неблагоприятных погодных условиях.

У всех изученных видов, кроме спиреи уссурийской, отмечено естественное возобновление семенами на территории ботанического сада. Обильный самосев характерен для спирей иволистной и дубравколистной. Самосев у форм и культиваров спиреи японской встречается только вблизи взрослых растений. Единичный самосев зафиксирован у спирей березолистной и низкой.

Заключение

Таким образом, в условиях культуры в ботаническом саду спиреи формируют разные по всхожести семена. Качество семян зависит как от видовых характеристик, так и от погодных условий в год формирования семян. На всхожесть семян спирей оказывали влияние различные метеофакторы. Избыточное увлажнение и низкие температуры в течение вегетационного периода, а также высокие средние температуры в зимний период отрицательно влияют на рост и развитие спирей, а следовательно, и на качество продуцируемых ими семян. Высота снежного покрова в марте имеет прямую связь с качеством семян, так как обеспечивает достаточный уровень влаги в почве в начале вегетационного периода.

Высокой лабораторной всхожестью характеризовались семена спиреи иволистной – 93,1 %. Высокий процент лабораторной всхожести семян был также у спирей низкой и дубравколистной (90,4 и 82,1 соответственно), что может свидетельствовать об их натурализации. Эти 3 вида спирей ежегодно формировали качественные семена. Всхожесть семян других спирей варьировала в разные годы, возможно, из-за более низкого адаптационного потенциала видов. Скорее всего, для этих видов спирей в условиях Среднего Урала более продуктивным способом размножения в производственных целях будет вегетативный способ. Грунтовая всхожесть у изучаемых видов оказалась ниже лабораторной. При этом практически все изученные виды спирей в разной степени способны возобновляться естественным путем на территории ботанического сада.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Абрамчук А.В., Карташева Г.Г., Карпучин М.Ю. Садово-парковое и ландшафтное искусство. Екатеринбург, 2013. 612 с.

Abramchuk A.V., Kartasheva G.G., Karpukhin M.Y. *Landscape Gardening and Design*. Yekaterinburg, 2013. 612 p. (In Russ.).

2. Баранов Д.С., Сродных Т.Б. Анализ видового состава насаждений сквера перед ТЦ «Пассаж» (г. Екатеринбург) // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: материалы XV Всерос. науч.-техн. конф. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2019. С. 333–335.

Baranov D.S., Srodnykh T.B. Analyses of the Species Composition of Garden Square near the Shopping Center “Passage” (Yekaterinburg). *Scientific Creativity of Youth to the Timber Complex of Russia: Proceedings of the XV All-Russian Science and Technology Conference*. Yekaterinburg, 2019, pp. 333–335. (In Russ.).

3. Власенко В.Э., Дорофеева Л.М., Яковлева С.В. Дендропарк-выставка как рефугиум живой природы города Екатеринбурга // Аграр. вестн. Урала. 2010. № 1(67). С. 66–69.

Vlasenko V.E., Dorofeeva L.M., Yakovleva S.V. Arboretum-Exhibition as a Refugium of Wild Nature in Yekaterinburg. *Agrarian Bulletin of the Urals*, 2010, no. 1(67), pp. 66–69. (In Russ.).

4. Зайцев Г.Н. Математическая статистика в экспериментальной ботанике. М.: Наука, 1984. 424 с.

Zaytsev G.N. *Mathematical Statistics in Experimental Botany*. Moscow, Nauka Publ., 1984. 424 p. (In Russ.).

5. Князев М.С., Чкалов А.В., Третьякова А.С., Золотарёва Н.В., Подгаевская Е.Н., Пакина Д.В., Куликов П.В. Конспект флоры Свердловской области. Ч. V: Двудольные растения (*Rosaceae*) // Фиторазнообразие Восточной Европы. 2019. Т. 13, № 4. С. 305–352.

Knyazev M.S., Chkalov A.V., Tretyakova A.S., Zolotareva N.V., Podgaevskaya E.N., Pakina D.V., Kulikov P.V. Annotated Checklist of the Flora of Sverdlovsk Region. Part V: Dicotyledonous Plants (*Rosaceae*). *Phytodiversity of Eastern Europe*, 2019, vol. 13, no. 4, pp. 305–352. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2072-8816-2019-10056>

6. Коропачинский И.Ю., Встовская Т.Н. Древесные растения Азиатской России. Новосибирск: Изд-во СО РАН, фил. «Гео», 2002. 707 с.

Koropachinskiy I.Yu., Vstovskaya T.N. *Woody Plants of Asian Russia*. Novosibirsk, Geo SB RAS Publ., 2002. 707 p. (In Russ.).

7. Макарова О.Б. Коллекция видов рода *Spiraea* L. в ботаническом саду УНЦ АН СССР // Новые декоративные растения в культуре на Среднем Урале: сб. науч. тр. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986. С. 97–102.

Makarova O.B. The *Spiraea* L. Collection in the Botanical Garden of the Ural Scientific Center of the Academy of Sciences of the USSR. *New Ornamental Plants of the Middle Urals*. Sverdlovsk, UNTs AN SSSR Publ., 1986, pp. 97–102. (In Russ.).

8. Мамаев С.А., Семкина Л.А. Интродуцированные деревья и кустарники Урала (розоцветные). Свердловск: УрО АН СССР, 1988. 104 с.

Mamayev S.A., Semkina L.A. *Introduced Trees and Shrubs of the Ural (Rosaceae)*. Sverdlovsk, UrO AN SSSR Publ., 1988. 104 p. (In Russ.).

9. Смирнова А.Н., Зайнуллина К.С. Особенности семенного размножения видов рода *Spiraea* L. в культуре на Европейском Северо-Востоке (Республика Коми) // Вестн. ТвГУ. Сер.: Биология и экология. 2019. № 3(55). С. 136–143.

Smirnova A.N., Zainullina K.S. Features of Seed Reproduction of Species of the Genus *Spiraea* L. in Culture in the European North-East (Komi Republic). *Bulletin of Tver State University. Series: Biology and Ecology*, 2019, no. 3(55), pp. 136–143. (In Russ.). <https://doi.org/10.26456/vtbio106>

10. Соколова Н.Н., Коробкова Т.С. Всхожесть семян местных и инорайонных видов *Spiraea* в культуре Якутского ботанического сада // Биологическое разнообразие. Интродукция растений: материалы VI Междунар. науч. конф. СПб.: Ботан. ин-т им. В.Л. Комарова РАН, 2016. С. 368–371.

Sokolova N.N., Korobkova T.S. Seed Germination of Various Species of *Spiraea* in the Yakut Botanic Garden. *Biodiversity. Plant Introduction. Proceedings of the VIth International Scientific Conference*. Saint Petersburg, Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences Publ., 2016, pp. 368–371. (In Russ.).

11. Ступникова Т.В. Биология семян видов рода *Spiraea* L., интродуцированных на юг Амурской области // Плодоводство и ягодоводство России. 2016. Т. 47. С. 321–330.

Stupnikova T.V. Biology of Seeds of the Species Belonging to the Genus *Spiraea* L. Cultivated in the South of the Amur Region. *Plodovodstvo i yagodovodstvo Rossii = Pomiculture and small fruits culture in Russia*, 2016, vol. 47, pp. 321–330. (In Russ.).

12. Халевицкая Г.С., Архипова Н.П., Фирюков Н.И., Кузнецова Г.П., Харитонова Н.К., Жукова Л.А., Романец А.А., Васильева Л.Д., Халевицкий З.З. Климат Свердловска / под ред. В.В. Морокова, Ц.А. Швер. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 190 с.

Khavelitskaya G.S., Arkhipova N.P., Firyukov N.I., Kuznetsova G.P., Kharitonova N.K., Zhukova L.A., Romanets A.A., Vasil'yeva L.D., Khalevitskiy Z.Z. *Climate of Sverdlovsk*. Ed. by V.V. Morokov, Ts.A. Shver. Leningrad. Gidrometeoizdat Publ., 1981. 190 p. (In Russ.).

13. Шильников М.А., Чернигова Е.Н., Шеметова И.С., Шеметов И.И. Эколого-биологическая оценка дикорастущих видов спиреи, перспективных для озеленения Предбайкалья // Вестн. КрасГАУ. 2016. № 8(119). С. 65–71.

Shilnikov M.A., Chernigova E.N., Shemetova I.S., Shemetov I.I. Ecological and Biological Assessment of Wild-Growing Types of the *Spiraea*, Perspective for Gardening of Baikal Region. *Bulletin of KrasGAU*, 2016, no. 8(119), pp. 65–71. (In Russ.).

14. Широкова Н.Г. Изменчивость проявлений самонесовместимости у представителей подсемейства *Spiraeoideae* (*Rosaceae*) // Бюл. Моск. общ-ва испытателей природы. Отдел биологический. 2011. Т. 116, вып. 5. С. 65–73.

Shirokova N.G. The Variability of Self-Incompatibility Manifestations in Some Species of Subfamily *Spiraeoideae* (*Rosaceae*). *Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Biological Series*, 2011, vol. 116, iss. 5, pp. 65–73. (In Russ.).

15. Borchardt J.R., Wyse D.L., Sheaffer C.C., Kauppi K.L., Fulcher R.G., Ehlke N.J., Biesboer D.D., Bey R.F. Antioxidant and Antimicrobial Activity of Seed from Plants of the Mississippi River Basin. *Journal of Medicinal Plants Research*, 2008, vol. 3, iss. 10, pp. 707–718.

16. Kim H.J., Lee K.C., Kim H.J., Kim Y.J. Seed Germination Response to Temperature, Cold Stratification Period, and Gibberellin Treatment in *Spiraea fritschiana*. *Horticultural Science and Technology*, 2016, vol. 34, iss. 4, pp. 557–563. <https://doi.org/10.12972/kjst.20160057>

17. Kostikova V.A., Shaldaeva T.M. The Antioxidant Activity of the Russian Far East Representatives of the *Spiraea* L. (*Rosaceae* Juss.) Genus. *Russian Journal of Bioorganic Chemistry*, 2017, vol. 43, iss. 7, pp. 790–794. <https://doi.org/10.1134/S1068162017070081>

18. Lu L.-D., Crinan A. *Spiraea* Linnaeus. Vol. 9. *Flora of China*. Beijing, Science Press, 2003, pp. 47–73.

19. Lu L.T. The Evolution and Distribution of Subfam. *Spiraeoideae* (*Rosaceae*) of China, with Special Reference to Distribution of the Subfamily in the World. *Journal of Systematics and Evolution*, 1996, vol. 34, iss. 4, pp. 361–375. (In Chin.).

20. Potter D., Still S.M., Grebenc T., Ballian D., Božič G., Franjioe J., Kraigher H. Phylogenetic Relationships in Tribe *Spiraeae* (*Rosaceae*) Inferred from Nucleotide Sequence Data. *Plant Systematics and Evolution*, 2007, vol. 266, pp. 105–118. <https://doi.org/10.1007/s00606-007-0544-z>

21. Shirshova T.I., Bezmaternykh K.V., Beshlei I.V., Smirnova A.N., Oktyabr'skii O.N. Antioxidant Properties of Extracts of Leaves and Inflorescences of *Spiraea media* Franz Schmidt from the Flora of Komi Republic. *Pharmaceutical Chemistry Journal*, 2020, vol. 54, pp. 622–625. <https://doi.org/10.1007/s11094-020-02246-3>

22. Stanton K.M., Weeks S.W., Dana M.N., Mickelbart M.V. Pruning of Meadowsweet and Steeplebush. *HortTechnology*, 2010, vol. 20, iss. 4, pp. 700–704. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.20.4.700>

23. Sun Y., Li L., Wang Y., Dai X. Morphological and Physiological Responses of *Spirea* Species to Saline Water Irrigation. *HortScience*, 2020, vol. 55, iss. 6, pp. 888–895. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14861-20>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья
УДК 630.181:625.77
DOI: 10.37482/0536-1036-2022-5-58-72

Состояние древесных растений на объектах защитного лесоразведения и озеленения Калачевского района Волгоградской области

А.С. Соломенцева, *ст. науч. сотр.*; ResearcherID: [W-4142-2018](https://orcid.org/0000-0002-5857-1004),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5857-1004>

Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, просп. Университетский, д. 97, г. Волгоград, Россия, 400062; alexis2425@mail.ru

Поступила в редакцию 25.11.20 / Одобрена после рецензирования 01.03.21 / Принята к печати 05.03.21

Аннотация. Калачевский район Волгоградской области относится к регионам, требующим стабилизации использования природных ресурсов. Озеленительные и агролесомелиоративные мероприятия обеспечат ресурсный потенциал ландшафтов района при возрастающей рекреационной и природной нагрузке. Исследования выявили, что различия в таксационных показателях, развитии, плодоношении и устойчивости растений обусловлены почвенно-климатическими условиями и антропогенным воздействием. Объекты исследований – древесные виды, преимущественно европейских ареалов: каштан посевной – *Castanea sativa* Mill., сосна Палласа (крымская) – *Pinus pallasiiana* D. Don., яблоня лесная – *Malus sylvestris* Mill., тополь белый (серебристый) – *Populus alba* L., ива белая (плакучая) – *Salix alba* L., дуб черешчатый – *Quercus robur* L., ясень обыкновенный – *Fraxinus excelsior* L., тополь пирамидальный – *Populus nigra* var. *italica* Münchh., вяз шершавый – *Ulmus glabra* Huds., смородина золотистая – *Ribes aureum* Pursh., сирень обыкновенная – *Syringa vulgaris* L., карагана кустарниковая – *Caragana frutex* (L.) K. Koch., бирючина обыкновенная – *Ligustrum vilgare* L., магония падуболистная – *Mahonia aquifolium* (Pursh) Nutt., шиповник коричный – *Rosa cinnamomea* L. Установлено, что относительно устойчивыми видами в Калачевском районе являются яблоня лесная, смородина золотистая (обладающая наилучшей устойчивостью к засолению), карагана древовидная, вяз шершавый, магония падуболистная, но они уступают по таксационным показателям и скорости роста тополям, ивам, сирени, каштанам. По ряду хозяйственно ценных признаков наилучшие показатели отмечены у каштана, ели, яблони, тополя, ивы, вяза, ясеня и шиповника. Наивысшим баллом декоративности для озеленительных насаждений обладают каштан, смородина, магония, сирень, бирючина, шиповник коричный. Наилучшими показателями плодоношения отличаются каштан, шиповник и дуб; средними – ясень и бирючина. Наиболее ярко выраженная стадия рекреационной дигрессии наблюдается на участках, удаленных от населенных пунктов: отмечаются загущение посадок, отсутствие санитарных рубок, средняя проходимость. Участки возле водоемов, а также скверы и парки требуют санитарного ухода, снижения рекреационной нагрузки и подбора видов из рекомендованного ассортимента деревьев и кустарников. Для обеспечения наибольшей устойчивости насаждений и получения быстрого лесоводственного эффекта в состав защитных и озеленительных насаждений засушливого региона должны быть включены долговечные, быстрорастущие виды, а также плодовые кустарники, рекомендованные в основной ассортимент.



Ключевые слова: деревья, кустарники, применение деревьев и кустарников в насаждениях, ассортимент деревьев и кустарников, озеленение, защитное лесоразведение, Волгоградская область

Благодарности: Работа выполнена по теме Государственного задания № 0713-2019-0009 «Теоретические основы, создание новых конкурентоспособных биотипов сельскохозяйственных культур с высокими показателями продуктивности, качества, устойчивости и сортовые технологии на основе новейших методов и технологических решений в условиях изменяющегося климата».

Для цитирования: Соломенцева А.С. Состояние древесных растений на объектах защитного лесоразведения и озеленения Калачевского района Волгоградской области // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 5. С. 58–72. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-58-72>

Original article

The Condition of Woody Plants at the Sites of Protective Afforestation and Landscaping of the Kalachevsky District, Volgograd Region

Aleksandra S. Solomentseva, Senior Research Scientist; ResearcherID: [W-4142-2018](https://orcid.org/0000-0002-5857-1004),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5857-1004>

Federal Scientific Centre for Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, prosp. Universitetskiy, 97, Volgograd, 400062, Russian Federation; alexis2425@mail.ru

Received on November 25, 2020 / Approved after reviewing on March 1, 2021 / Accepted on March 5, 2021

Abstract. The Kalachevsky district of the Volgograd region belongs to the regions that require stabilization of natural resources use. Land and forest reclamation and landscaping will ensure the resource potential of the district's landscapes at increasing recreational and natural load. The studies have shown that differences in inventory parameters, development, fruiting and sustainability of plants are due to soil and climatic conditions, and anthropogenic impact. The research objects are woody species, predominantly of European habitats: sweet chestnut – *Castanea sativa* Mill.; Pallas pine (Crimean pine) – *Pinus pallasiana* D. Don.; European crab apple – *Malus sylvestris* Mill.; white poplar (silver poplar) – *Populus alba* L.; white willow – *Salix alba* L.; English oak – *Quercus robur* L.; European ash – *Fraxinus excelsior* L.; Lombardy poplar – *Populus nigra* var. *italica* Münchh.; wych elm – *Ulmus glabra* Huds.; golden currant – *Ribes aureum* Pursh.; common lilac – *Syringa vulgaris* L.; Russian pea shrub – *Caragana frutex* (L.) K. Koch; common privet – *Ligustrum vilgare* L.; Oregon grape – *Mahonia aquifolium* (Pursh.) Nutt.; cinnamon rose – *Rosa cinnamomea* L. It was found that relatively stable species in the Kalachevsky district are European crab apple, golden currant (which has the best salinity resistance), Russian pea shrub, wych elm, Oregon grape, but they are inferior to poplars, willows, lilacs, chestnuts in inventory parameters and growth rate. The best performance on a number of economically valuable features were observed in chestnut, spruce, apple, poplar, willow, elm, ash, and rose. Chestnut, currant, Oregon grape, lilac, privet, cinnamon rose have the highest score of ornamentality for landscaping plantations. Chestnut, rose, and oak have the best fruiting rates; ash and privet have medium fruiting rates. The strongest stage of recreational digression is observed in areas remote from settlements: there is densification of plantings, lack of sanitary cuttings, medium passability. Areas near water sources, as well as public gardens and parks, require sanitary care, reduction of recreational pressure and the selection of species from the recommended range of trees and shrubs. In order to ensure the greatest sustainability of plantings and obtain a rapid silvicultural effect,



perennial, fast-growing species as well as fruit shrubs recommended in the basic assortment should be included in the protective and landscaping plantations of the arid region.

Keywords: trees, shrubs, use of trees and shrubs in plantations, assortment of trees and shrubs, landscaping, protective afforestation, Volgograd region

Acknowledgments: The work was carried out within the topic of the State Assignment No. 0713-2019-0009 “Theoretical Foundations, Development of New Competitive Crop Biotypes with High Rates of Productivity, Quality, Sustainability and Varietal Technologies Based on the Latest Methods and Technological Solutions in a Changing Climate”.

For citation: Solomentseva A.S. The Condition of Woody Plants at the Sites of Protective Afforestation and Landscaping of the Kalachevsky District, Volgograd Region. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 5, pp. 58–72. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-58-72>

Введение

Волгоградская область относится к крайне малолесным регионам, более 28 % земель ее лесного фонда лишены древесной растительности. Лесные насаждения в данном регионе выполняют множество функций – водоохранные, почвозащитные, климаторегулирующие, санитарно-гигиенические [1, 15, 16]. Основным направлением лесного хозяйства является повышение защитных свойств лесных насаждений, их устойчивости к неблагоприятным климатическим факторам [4, 19, 20]. Высокоэффективная борьба с пыльными бурями, оврагообразованием, снижением плодородия почв возможна посредством создания искусственных защитных лесных насаждений (ЗЛН) как наиболее экономичного и безопасного вида мелиорации [7, 18]. Одним из главных условий, обеспечивающих создание устойчивых, долговечных и эффективных в агролесомелиоративном отношении насаждений, является правильный подбор ассортимента древесных видов [10].

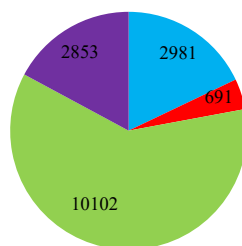
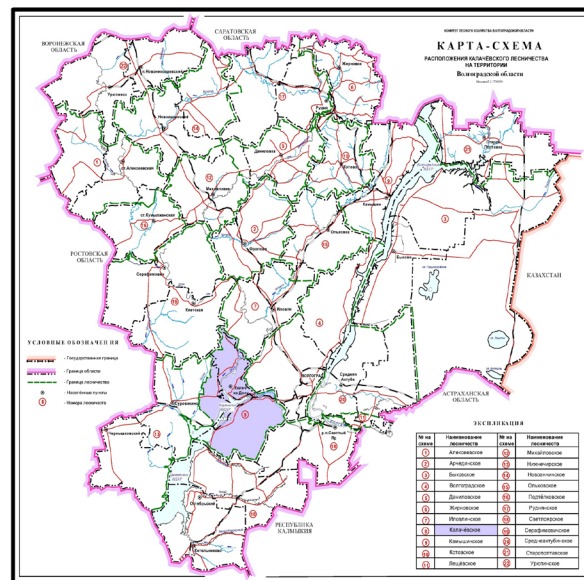
Древесные виды в аридных условиях растут иначе, чем в регионах с умеренным климатом [6]. Здесь складывается их особый фенологический тип, а возрастные изменения и процессы роста очень интенсивны, растения быстро вступают в фазу цветения и плодоношения, ювенильный период составляет 3–3,5 года у деревьев, 1,2–2 года у кустарников. Раннее плодоношение – один из важных факторов, который ведет к снижению вегетативного роста древесных пород и к старению. На защитные и озеленительные насаждения, создаваемые в засушливых условиях, оказывают сильное влияние уровень освещения, ветра, недостаточное увлажнение, повышенная испаряемость, резкие перепады температур, различные экологические факторы окружающей среды [14, 17, 21]. Волгоградская область располагает достаточно значительными термическими ресурсами – сумма положительных температур выше 10 °C – 3001–3500. Продолжительность периода с температурой воздуха выше 10 °C – 149 дн. [4].

Большой проблемой является антропогенная нагрузка в зонах отдыха, парках и скверах на существующие лесные насаждения и, как следствие, их дигрессия. В связи с этим подбор ассортимента древесных видов для защитного лесоразведения и озеленения в условиях Волгоградской области должен быть основан на использовании видов, которые быстро приспосабливаются к охарактеризованным условиям произрастания, на отборе отдельных форм, пород и видов, наиболее устойчивых к неблагоприятным условиям среды, на интродукции и селекции перспективных деревьев и кустарников из регионов со схожими условиями произрастания.

Цель исследования – выявление особенностей роста, фенологического развития, устойчивости к рекреационной дигрессии и природным особенностям засушливого региона видов деревьев и кустарников, подбор ассортимента для агролесомелиоративных и озеленительных целей под влиянием основных климатических факторов в засушливых условиях произрастания.

Объекты и методы исследования

Исследования проводились в Калачевском лесничестве и прилегающих к нему территориях: участок лесополосы в пригороде г. Калач-на-Дону, загущенный участок лесной полосы Калачевского лесничества, участок лесных насаждений по берегу Волго-Донского судоходного канала протяженностью 12 км, сквер пос. Пятиморск, пляжная зона пос. Пятиморск – общая площадь которых составляет 34 296 га (рис. 1) [10].



- Леса, расположенные в лесопарковых зонах
- Государственные защитные лесные полосы
- Противоэрозионные леса
- Нерестоохраняемые полосы лесов

Рис. 1. Местоположение (сверху) и распределение (га) лесов Калачевского лесничества по категориям (снизу)
 Fig.1. Location (top) and distribution (ha) of forests of the Kalachevsky forest district by categories (bottom)

Объектами исследований являлись виды деревьев и кустарников с различными ареалами: каштан посевной – *Castanea sativa* Mill., сосна Палласа (крымская) – *Pinus pallasiana* D. Don., яблоня лесная – *Malus sylvestris* Mill., тополь белый (серебристый) – *Populus alba* L., ива белая (плакучая) – *Salix alba* L., дуб черешчатый – *Quercus robur* L., ясень обыкновенный – *Fraxinus excelsior* L., тополь пирамидальный – *Populus nigra* var. *italica* Münchh., вяз шершавый – *Ulmus glabra* Huds., смородина золотистая – *Ribes aureum* Pursh., сирень обыкновенная – *Syringa vulgaris* L., карагана кустарниковая – *Caragana frutex* (L.) K. Koch., бирючина обыкновенная – *Ligustrum vilgare* L., магония падуболистная – *Mahonia aquifolium* (Pursh) Nutt., шиповник коричный – *Rosa cinnamomea* L. (рис. 2).

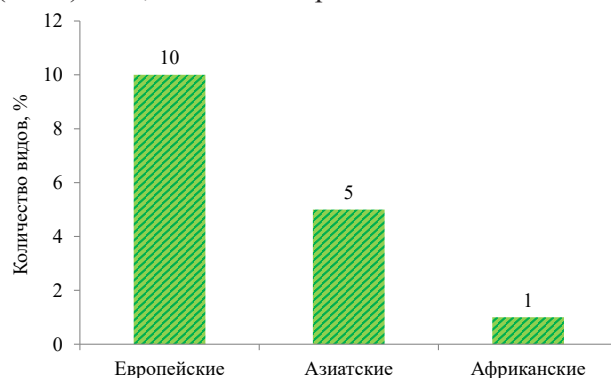


Рис. 2. Распределение видов по естественным ареалам

Fig. 2. Species distribution by natural habitats

Площадь, покрытая лесной растительностью, – 12 854 га, общий запас древесины – 832,6 тыс. м³, общий средний запас прироста древесины – 25,0 тыс. м³. Исследуемых участков – 12 шт., состав насаждений – 3Д2С3Ивд2Т [8]:

1. год посадки – 1950, площадь – 4,20 га, количество растений – 118;
2. год посадки – 1950, площадь – 4,20 га, количество растений – 118;
3. год посадки – 1960, площадь – 5,50 га, количество растений – 4872;
4. год посадки – 1961, площадь – 2,00 га, количество растений – 2679;
5. год посадки – 1952, площадь – 5,7 га, количество растений – 8439;
6. год посадки – 1958, площадь – 5,00 га, количество растений – 80 644;
7. год посадки – 1950, площадь – 0,47 га, количество растений – 1000;
8. год посадки – 1950, площадь – 0,39 га, количество растений – 1170;
9. год посадки – 1957, площадь – 1,70 га, количество растений – 2644;
10. год посадки – 1950, площадь – 0,10 га, количество растений – 200;
11. год посадки – 1959, площадь – 0,15 га, количество растений – 280;
12. год посадки – 1954, площадь – 0,20 га, количество растений – 183.

Описывалось по 24 дерева на каждой площадке – по 6 деревьев с каждой из сторон света.

Устойчивость насаждений к неблагоприятным факторам среды оценивалась в баллах [13]: 1 балл – здоровые насаждения, в которых не менее 90 % хвойных и не менее 70 % лиственных здоровых растений; 2 балла – у растений отмечаются замедленный рост, бледная окраска стволов, листьев, цветков и плодов, в насаждениях 71–90 % хвойных, 51–70 % лиственных здоровых насаждений; 3 балла – рост ослаблен, подлесок и почвы вытоптаны, видны повреждения растений, в насаждениях 51–70 % хвойных, 31–50 % лиственных здоровых растений; 4 балла – рост растений прекращен, приросты и подлесок отсутствуют, почва вытоптана, в насаждениях менее 50 % хвойных и 30 % лиственных здоровых растений.

Рекреационная нагрузка оценивалась по стадиям: 1-я стадия – признаков рекреационной дигрессии нет; 2-я стадия – незначительное изменение в лесной среде; 3-я стадия – значительное изменение лесной среды, требуется регуляция рекреационной нагрузки; 4-я стадия – лесная среда сильно нарушена, повреждены древесные насаждения, почва вытоптана, необходимо строгое регулирование рекреационной нагрузки; 5-я стадия – сильная деградация лесной среды, усыхание и повреждение древесной растительности, рекреационная нагрузка недопустима. Проходимость и просматриваемость определялись визуально по следующим признакам: хорошая – удобное передвижение среди насаждений и хорошая видимость на расстоянии 40 м и более; средняя – ограниченное передвижение среди насаждений, затрудненная видимость на расстоянии 21–40 м; плохая – передвижение крайне затруднено, отсутствие видимости на расстоянии 20 м и менее 1 м [11, 12]. Декоративность изучалась по методикам Ж.А. Варданяна [3]; фенологическое развитие – с помощью комплексного описательного метода [5, 6]; таксационные признаки и перспективность видов – по методике С.В. Залесова [5]. Морфологические признаки растений определялись по методике Л.И. Лотовой и Л.С. Савельевой [9, 13]. Эстетическая оценка давалась по классу бонитета: 1 балл – I–I класс бонитета, 2 балла – III–IV класс, 3 балла – IV–V класс. Категория состояния насаждений характеризовалась по шкале: 1 – здоровые насаждения, 2 – ослабленные, 3 – сильно ослабленные, 4 – наблюдается усыхание, 5 – сухостой текущего года, 6 – старый сухостой.

Морозоустойчивость, засухоустойчивость, солевыносливость, быстрота роста, требовательность к почве указывались в баллах: 3 – сильная, 2 – средняя, 1 – слабая. Порослевозобновительная способность изучалась визуально. Учет и оценка возобновления производились также визуально. Аромат цветков оценивался по шкале: 5 баллов – очень сильный, 4 балла – сильный, 3 балла – средний, 2 балла – слабый, 1 балл – очень слабый; степень декоративности: 25 баллов – низкая, 26–30 баллов – средняя, 31–35 – высокая, 36 и более – очень высокая.

Полученные данные обрабатывались статистическими методами в программах Microsoft Excel, Statistica 13.

Результаты исследования и их обсуждение

Главным критерием агролесомелиоративного обустройства и защитного лесоразведения в засушливой зоне является многофункциональность подобранных видов, за счет выполнения природоохранных и средообразующих задач они должны способствовать рациональному использованию естественных ресурсов. Наблюдения выявили влияние ряда обобщенных показателей климата, почвенных условий и таксационных признаков на возможности применения деревьев и кустарников в насаждениях различного назначения с учетом использования при выращивании с целью повышения их устойчивости и долговечности оптимальных технологий. Относительно устойчивыми видами являются яблоня лесная, карагана древовидная, вяз шершавый, магония падуболистная, но они уступают по таксационным показателям и скорости роста тополям, ивам, сирени, каштанам (табл. 1).

Таблица 1

**Биологическая характеристика, ассортимент деревьев и кустарников
в Калачевском лесничестве**
**Biological characteristics and assortment of trees and shrubs
in the Kalachevsky forest district**

Вид	Проекция кроны, м	Форма кроны	Диаметр ствола, м	Морозоустойчивость	Засухоустойчивость	Солевыносливость	Требовательность к почве	Быстрота роста	Возобновление
<i>Castanea sativa</i> Mill.	9,2×13	РСРП	1,9	1	1	1	3	3	СР, П
<i>Pinus pallasiana</i> D. Don.	10×15	ШЯ	0,5	3	1	1	1	3	НВ
<i>Malus sylvestris</i> Mill.	3,5×5,5	РСК	0,4	3	2	2	1	2	СР, П
<i>Populus alba</i> L.	2,5×3,0	РСК	2,0	2	1	1	3	3	С, П
<i>Salix alba</i> L.	6,1×7,4	ОКР	3,0	1	1	1	1	3	С, П
<i>Quercus robur</i> L.	30×10	РСК	1,5	2	3	2	2	2	СР, П
<i>Fraxinus excelsior</i> L.	6,0×8,0	РСК	1,0	2	1	2	3	2	СР, П
<i>Populus nigra</i> var. <i>italica</i> Münchh.	2,8×3,2	ПИР	1,0	1	1	1	3	3	СЛ, П
<i>Ulmus glabra</i> Huds.	5,0×11	РСК	1,5	2	3	3	1	2	СР, П
<i>Ribes aureum</i> Pursh.	2,0×2,5	ШАР	2,8	3	3	3	1	2	СР, П
<i>Syringa vulgaris</i> L.	4,0×4,8	РСК	3,9	3	1	1	3	3	С, П
<i>Caragana frutex</i> (L.) K. Koch.	4,0×3,2	РСК	3,1	3	3	3	1	3	С, КО
<i>Ligustrum vilgare</i> L.	0,7×1,0	ОКР	1,6	2	3	3	1	1	С, П
<i>Mahonia aquifolium</i> (Pursh.) Nutt.	0,9×2,1	РСК	1,0	3	3	3	1	2	НВ
<i>Rosa cinnamomea</i> L.	2,2×2,5	РСК	0,8	3	2	1	1	2	С, КО, П

Примечание: РСРП – распростертая; ШЯ – широкояйцевидная; РСК – раскидистая; ОКР – округлая; ПИР – пирамидальная; ШАР – шаровидная; СР – среднее; С – сильное; СЛ – слабое; П – поросль; КО – корнеотпрысковое; НВ – нет возобновления.

В соответствии с возобновительной способностью и таксационными показателями для полезащитных лесных полос подходят сосна, яблоня, тополь, дуб черешчатый, вяз, ясень, карагана, смородина, магония. Смородина золотистая в лесных полосах по сравнению с деревьями более устойчива к засолению почвы, засухе (выдерживает до 42 °С), кроме того, прекрасно приспособлена к росту на почвах с близким залеганием солевого горизонта.

Формирование высоких древостоев в полезащитном лесоразведении зависит от светового режима в насаждении. Для овражно-балочных насаждений пригодны дуб, яблоня, ива, ясень, вяз, сирень, бирючина, шиповник коричный. Для пастбищ подходящими являются ива, ясень, вяз, карагана и шиповник.

Для закрепления песков используется сосна крымская. В озеленительных насаждениях парков и скверов встречаются все вышеперечисленные виды.

По форме кроны и очищаемости ствола можно судить о степени светолюбивости вида. Наиболее требовательными к свету являются сосна, вяз, тополь, ива, ясень, карагана, среднесветолюбивыми – дуб, яблоня, ясень, бирючина.

Правильный подбор ассортимента видов для озеленительных и декоративных насаждений важен для формирования их устойчивости и долговечности. В последние годы негативные последствия научно-технического прогресса нарушают гармонию человека с окружающей средой. Разнообразие ландшафта имеет огромное эстетическое, оздоровительное и рекреационное воздействие, а все ЗЛН возможно рассматривать с точки зрения существенных элементов пространственной структуры ландшафтов. ЗЛН обладают выразительностью, устойчивостью, своеобразной окраской цветков, листьев, коры, конфигурацией кроны и придают местности красоту и завершенность. В сухостепной зоне подбор ассортимента деревьев и кустарников для озеленения парков и скверов особенно сложен ввиду ограниченности количества устойчивых видов. В Калачевском районе в основном преобладают куртинные и полосные насаждения. Проектирование парков основано на подборе растений, выполняющих функциональную и эстетическую роль. В ходе исследований были выделены самые перспективные деревья и кустарники, представляющие наибольшую значимость по декоративным качествам (табл. 2).

Таблица 2

Декоративные свойства древесных видов в Волгоградской области
Decorative properties of tree species in the Volgograd region

Вид	Окраска цветков	Аромат цветков, балл	Дата массового цветения	Продуктивность цветения, дн.	Дата массового плодоношения	Декоративность, балл
<i>Castanea sativa</i> Mill.	Белый	4	07.05	16	10.10	35
<i>Malus sylvestris</i> Mill.	Белый	3	17.05	14	15.08	31
<i>Populus alba</i> L.	Красный/желтый	1	26.04	6	17.06	26
<i>Salix alba</i> L.	Желтый	1	5.05	8	8.06	26
<i>Quercus robur</i> L.	Желтый	1	20.05	9	26.09	26
<i>Fraxinus excelsior</i> L.	Розовый	1	7.05	8	18.09	25
<i>Populus nigra</i> var. <i>italica</i> Münchh.	Желтый, зеленый	1	4.05	7	28.07	26
<i>Ulmus glabra</i> Huds.	Фиолетовый (мужской)	1	25.04	6	27.05	26
<i>Ribes aureum</i> Pursh.	Желтый	5	9.05	13	15.06	36
<i>Syringa vulgaris</i> L.	Фиолетовый, лиловый	5	3.05	13	11.09	36
<i>Caragana frutex</i> (L.) K. Koch.	Желтый	3	16.05	25	15.07	31
<i>Ligustrum vilgare</i> L.	Белый	3	20.05	15	25.09	35
<i>Mahonia aquifolium</i> (Pursh.) Nutt.	Желтый	2	7.05	20	25.08	36
<i>Rosa cinnamomea</i> L.	Розовый	3	5.04	11	5.09	35

Наряду с широким использованием видов деревьев и кустарников в насаждениях различного типа и назначения, о чем было сказано выше, следует учитывать и их лекарственное, промышленное, медоносное и другие значения. Это даст возможность в полной мере реализовать их потенциал. В Калачевском районе как малолесном регионе защитные и озеленительные насаждения представляют собой огромный ресурс, обладают не только эстетической привлекательностью, но и применимы для побочного использования (табл. 3). Исследования показали, наибольшая эффективность и проявление полезных свойств и системных качеств свойственны взрослым развитым насаждениям.

Таблица 3

Значение древесных видов и возможность их применения
The importance of tree species and the possibility of their application

Вид	Возраст, лет	Значение*					
		I	II	III	IV	V	VI
<i>Castanea sativa</i> Mill.	55	☼	☼	☼	☼	☼	☼
<i>Pinus pallasiana</i> D. Don.	52	☼	☼	☼		☼	☼
<i>Malus sylvestris</i> Mill.	55	☼	☼		☼	☼	☼
<i>Populus alba</i> L.	62	☼	☼	☼	☼	☼	☼
<i>Salix alba</i> L.	64	☼	☼	☼	☼	☼	☼
<i>Quercus robur</i> L.	65	☼	☼	☼	☼	☼	☼
<i>Fraxinus excelsior</i> L.	68	☼	☼	☼	☼	☼	☼
<i>Populus nigra</i> var. <i>italica</i> Münchh.	58	☼	☼	☼	☼	☼	☼
<i>Ulmus glabra</i> Huds.	52		☼			☼	☼
<i>Ribes aureum</i> Pursh.	10	☼	☼		☼	☼	☼
<i>Syringa vulgaris</i> L.	22					☼	
<i>Caragana frutex</i> (L.) K. Koch.	19	☼		☼	☼	☼	☼
<i>Ligustrum vilgare</i> L.	15			☼	☼	☼	☼
<i>Mahonia aquifolium</i> (Pursh.) Nutt.	16					☼	☼
<i>Rosa cinnamomea</i> L.	18	☼	☼	☼	☼	☼	☼

* I – лекарственное; II – пищевое; III – техническое; IV – медонос; V – декоративное; VI – почвоукрепляющее [2]. «☼» – имеет значение; пустая ячейка – нет значения.

При правильной организации семенного дела и учете почвенно-климатических условий, способов посева, а также сроков сбора плодов и семян можно заготовить семенной фонд широкого ассортимента древесных и кустарниковых видов для внедрения в защитные и озеленительные насаждения, создания питомников и плантаций. Данные проведенных исследований описаны в табл. 4 и характеризуют каштан и дуб как виды, обладающие наибольшей массой семян и самым высоким процентом выхода семян из плодов. Хорошие показатели, кроме того, отмечены у ясеня, имеющего широкий ареал, шиповника коричного, достаточно морозостойкого, засухоустойчивого и нетребовательного к почвам вида, и бирючины, отлично переносящей все виды обрезки и используемой в посадках декоративного типа.

Таблица 4

**Нормы высева древесных видов для агролесомелиорации и озеленения
засушливой зоны**
**Seeding rates of tree species for land and forest reclamation and landscaping
in the arid zone**

Вид	Масса 1000 се- мян, г*	Выход семян, %	Время сбора, месяц	Норма высева на 1 га, кг*	Глубина заделки, см*
<i>Castanea sativa</i> Mill.	10 000	90	9–10	9000	8,0–10,0
<i>Pinus pallasiana</i> D. Don.	18	3	10–12	90	1,0–2,0
<i>Malus sylvestris</i> Mill.	23	2	9–10	60	3,0–4,0
<i>Quercus robur</i> L.	3000	85	10	3500	7,0–10,0
<i>Fraxinus excelsior</i> L.	7	55	5–6	120	1,0–2,0
<i>Ulmus glabra</i> Huds.	7	85	6	120	1,0–2,0
<i>Ribes aureum</i> Pursh.	2	5	7	12	1,0–2,0
<i>Syringa vulgaris</i> L.	10	10	10	100	0,6
<i>Caragana frutex</i> (L.) K. Koch.	28	20	7	120	3,0–4,0
<i>Ligustrum vilgare</i> L.	22	19	9–10	120	2,0–3,0
<i>Mahonia aquifolium</i> (Pursh.) Nutt.	12	65	9–10	20	1,0
<i>Rosa cinnamomea</i> L.	12	90	9–10	105	2,0–3,0

* Данные из [1].

Как показали наблюдения и обследования участков лесных насаждений, объекты Калачевского района, включая участки кратковременного использования и сезонные объекты, подвергаются антропогенной нагрузке в течение всех сезонов года. По состоянию к 1-й категории относятся парки, скверы, водоемы, пляжи, ко 2-й – лесные полосы с участками сбора грибов и ягод, к 3-й – лесные насаждения с наличием старовозрастных видов (табл. 5).

Обследованиями установлено, что меньше всего страдают от рекреационной нагрузки загущенные участки лесополосы, находящиеся на удалении от населенных пунктов. Незначительная нагрузка отмечена на участке лесных насаждений по берегам Волго-Донского канала и на территории сквера в центральной части пос. Пятиморск. Наиболее выраженную стадию рекреационной дигрессии можно наблюдать у водоемов – там отмечается наличие мусора, насаждений неудовлетворительного состояния, требующих санитарного ухода, а также наличие вытоптаных участков в лесных полосах.

В зонах отдыха с начала пожароопасного сезона в регионе исследований (с 1 апреля по 31 октября 2020 г.) было зафиксировано и ликвидировано 13 лесных пожаров на площади 1200 га. Причина – нарушение пожарной безопасности в лесу. Эти показатели во много раз превышают данные по предыдущему 2019 г. Всего за пожароопасный период чрезвычайно опасными были признаны 110 дн. Несмотря на это, в зонах рекреационной нагрузки (участок 5, табл. 5) многие виды смогли восстановиться, продолжили хорошо расти и развиваться. В основном это были кустарники (рис. 3).

Таблица 5

**Характеристика насаждений на участках с различными стадиями
рекреационной дигрессии**

Stand conditions in areas with different stages of recreational digression

Номер участка*	Категория состояния	Эстетическая оценка	Устойчивость насаждений	Проходимость	Просматриваемость	Рекреационная дигрессия, балл	Виды, устойчивые к дигрессии
3, 6	1	1	1	Средняя	Средняя	1	<i>Malus sylvestris</i> Mill., <i>Ligustrum vilgare</i> L.
5, 9	1	1	1	Средняя	Средняя	1	<i>Quercus robur</i> L., <i>Caragana frutex</i> (L.) K. Koch.
1, 2, 12	2	1	2	Хорошая	Хорошая	2	<i>Salix alba</i> L., <i>Fraxinus excelsior</i> L., <i>Ulmus glabra</i> Huds.
7, 10, 11	6, 6a	3	4	Хорошая	Хорошая	2	<i>Rosa cinnamomea</i> L., <i>Mahonia aquifolium</i> (Pursh.) Nutt., <i>Syringa vulgaris</i> L., <i>Castanea sativa</i> Mill.
4, 8	3	3	4	Хорошая	Хорошая	3	<i>Populus alba</i> L., <i>Populus nigra</i> var. <i>italica</i> Münchh., <i>Ribes aureum</i> Pursh.

* 3, 6 – участок лесополосы в пригороде г. Калач-на-Дону; 5, 9 – загущенный участок лесной полосы Калачевского лесничества; 1, 2, 12 – участок лесных насаждений по берегу Волго-Донского судоходного канала протяженностью 12 км; 7, 10, 11 – сквер пос. Пятиморск; 4, 8 – пляжная зона пос. Пятиморск.



Рис. 3. Восстановившийся после пожаров кустарник *Ribes aureum* Pursh.

Fig. 3. Shrub of *Ribes aureum* Pursh. recovered after fires

Размещение защитных и озеленительных лесонасаждений в условиях Калачевского района основано на учете двух важнейших факторов – лесорастительных условий и размера защитных агролесомелиоративных зон. Первый из этих факторов определяет проектную и фактическую защитную высоту лесных полос, долговечность насаждений, а второй обуславливает нормативную вели-

чину межполосного пространства, равную проектной высоте насаждения или рассчитанную с учетом проектной высоты лесных полос. Расстояние между основными лесными полосами в насаждениях лесничества не превышает 250 м.

Уход за насаждениями должен включать обработку от вредителей и болезней, сохранение почвенной влаги, прореживание и рубки ухода, ограничение рекреационной нагрузки. Так, в лесничестве установлены сроки сбора плодов лекарственных видов: для яблони лесной – август–октябрь (разрешен однократный сбор), для смородины золотистой – июль–август (однократно), для шиповника – август–октябрь (однократно).

В состав лесных полос вводят кустарники, хорошо переносящие обрезку и формирующие плотную конструкцию. Высоко ценятся медоносы – медопродуктивность ивы на территории 1 га лесничества составляет 100–150 кг, яблони – 30–50 кг, смородины – 50–70 кг.

При подборе породного состава рекомендуются наиболее полезные в эколого-хозяйственном отношении виды, которые впоследствии могут быть использованы в качестве маточных при заготовке семян, черенков, плодов (рис. 4).

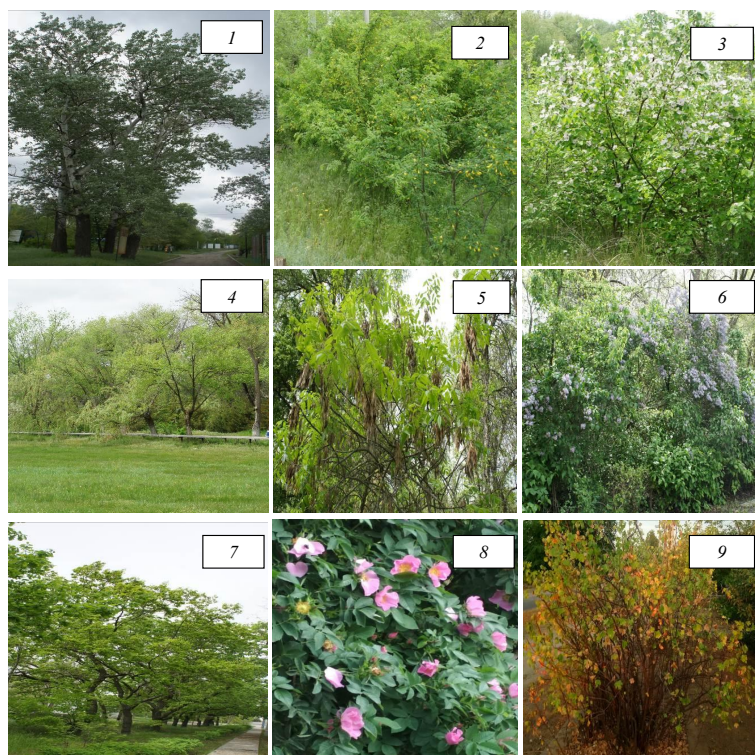


Рис. 4. Ассортимент видов для защитных и озеленительных насаждений Калачевского района: 1 – *Populus alba* L.; 2 – *Caragana frutex* (L.) K. Koch.; 3 – *Malus sylvestris* Mill.; 4 – *Salix alba* L.; 5 – *Fraxinus excelsior* L.; 6 – *Syringa vulgaris* L.; 7 – *Quercus robur* L.; 8 – *Rosa cinnamomea* L.; 9 – *Ribes aureum* Pursh.

Fig. 4. Assortment of species for protective and landscaping plantings of the Kalachevsky district: 1 – *Populus alba* L.; 2 – *Caragana frutex* (L.) K. Koch.; 3 – *Malus sylvestris* Mill.; 4 – *Salix alba* L.; 5 – *Fraxinus excelsior* L.; 6 – *Syringa vulgaris* L.; 7 – *Quercus robur* L.; 8 – *Rosa cinnamomea* L.; 9 – *Ribes aureum* Pursh.

Рубки осветления проводятся для древесных видов возраста более 50–60 лет, рубки прочистки – для видов 11–20 лет и 6–10 лет, рубки прореживания – для деревьев 21–40-летнего и 11–20-летнего возраста, проходные рубки – для насаждений возраста более 20–40 лет. У хвойных видов возраст, в котором проводят рубки осветления, составляет 10 лет, рубки прочистки – 11–20 лет, рубки прореживания – 21–60 лет, проходные рубки – более 40–60 лет.

При рубках ухода следует учитывать отношение древесно-кустарниковых видов к свету. Теневыносливые виды компенсируют меньшую интенсивность ассимиляции углекислоты большей массой листовой поверхности, поэтому при рубках осветления у теневыносливых видов должна оставаться бóльшая масса листьев, чем у светолюбивых.

Заключение

Таким образом, исследования, проведенные в Калачевском районе Волгоградской области, позволили выделить виды, наиболее устойчивые к комплексу почвенно-климатических факторов, ежегодно плодоносящие, выдерживающие рекреационную нагрузку и достигающие при этом своего оптимального возраста. В составе насаждений лесничества преобладают виды с европейским ареалом.

Для использования в озеленительных насаждениях в условиях Калачевского района наиболее перспективными видами являются дуб черешчатый – *Quercus robur* L., тополь пирамидальный – *Populus nigra* var. *italica* Münchh., каштан посевной – *Castanea sativa* Mill., смородина золотистая – *Ribes aureum* Pursh., бирючина обыкновенная – *Ligustrum vulgare* L., яблоня лесная – *Malus sylvestris* Mill., магония падуболистная – *Mahonia aquifolium* (Pursh.) Nutt., сирень обыкновенная – *Syringa vulgaris* L.

В ассортимент насаждений для лесовосстановления и лесоразведения следует включать виды деревьев и кустарников, обладающие наиболее выраженными таксационными и возобновительными свойствами. Для сухого и свежего бора, сухой и свежей субори, сухой, свежей и влажной дубравы, а также свежей, влажной, сырой и мокрой поймы в качестве целевых пород рекомендованы сосна, вяз, дуб, тополь и ива. В качестве сопутствующей породы желательны яблоня, смородина и шиповник.

К породам, не подлежащим реконструкции, относится ясень обыкновенный. К видам, выдерживающим рекреационную дигрессию и рекомендуемым к посадке в районах с высокой рекреационной нагрузкой, – карагана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Абакумова Л.И., Барабанов А.Т., Белицкая М.Н. и др. Агроресомелиорация / под ред. А.Л. Иванова, К.Н. Кулика. 5-е изд., перераб. и доп. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2006. 746 с.

Abakumova L.I., Barabanov A.T., Belitskaya M.N. et al. *Land and Forest Reclamation*. Ed. by A.L. Ivanov, K.N. Kulik. Volgograd, VNIALMI Publ., 2006. 746 p. (In Russ.).

2. Абышева Л.Н., Буданцев А.Л., Лесиовская Е.Е. и др. Дикорастущие полезные растения России. СПб.: СПХФА, 2001. 663 с.

Abysheva L.N., Budantsev A.L., Lesiovskaya E.E. et al. *Wild Useful Plants of Russia*. Saint Petersburg, SPKhFA Publ., 2001. 663 p. (In Russ.).

3. Варданян Ж.А. Методологические аспекты оценки декоративности древесных растений // Докл. Нац. акад. наук Армении. 2017. Т. 117, № 4. С. 340–349.

Vardanyan J.A. Methodological Aspects of Assessing the Decorative Value of Woody Plants. *Proceedings of National Academy of Sciences of Armenia*, 2017, vol. 117, no. 4, pp. 340–349. (In Russ.).

4. Гордеев А.В., Клещенко А.Д., Черняков Б.А., Сиروتенко О.Д. Биоклиматический потенциал России: теория и практика. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2006. 512 с.

Gordeev A.V., Kleshchenko A.D., Chernyakov B.A., Sirotenko O.D. *Bioclimatic Potential of Russia: Theory and Practice*. Moscow, KMK Publ., 2006. 512 p. (In Russ.).

5. Залесов С.В., Платонов Е.П., Залесова Е.С., Оплетев А.С., Данчева А.В., Крекова Я.А. Изучение перспективности древесных интродуцентов. Екатеринбург: УГЛТУ, 2014. 13 с.

Zalesov S.V., Platonov E.P., Zalesova E.S., Opletaev A.S., Dancheva A.V., Krekova Ya.A. *Studying the Prospects of Woody Introduced Species*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2014. 13 p. (In Russ.).

6. Иваненко Б.И. Фенология древесных и кустарниковых пород. М.: Сельхозиздат, 1962. 184 с.

Ivanenko B.I. *Phenology of Tree and Shrub Species*. Moscow, Sel'khozizdat Publ., 1962. 184 p. (In Russ.).

7. Кулик К.Н., Дубенок Н.Н., Рулев А.С., Пугачева А.М. ВНИАЛМИ – лидер агролесомелиоративной науки России: современная концепция защитного лесоразведения // Вестн. Волгогр. гос. ун-та. Сер. 11: Естеств. науки. 2015. № 3(13). С. 108–114.

Kulik K.N., Dubenok N.N., Rulev A.S., Pugacheva A.M. All-Russian Scientific Research Amelioration Institute – the Leader of the Russian Agroforestry Science: The Modern Concept of Protective Afforestation. *Science of VolSU. Natural sciences*, 2015, vol. 3(13), pp. 108–114. (In Russ.).

8. Лесохозяйственный регламент Калачеевского лесничества Воронежской области. Приложение к приказу управления лесного хозяйства Воронежской области от 3 сент. 2018 г. № 850. Воронеж, 2019. 242 с. Режим доступа: <https://www.garant.ru/doc/1224948/> (дата обращения: 29.08.22).

Forestry Regulations of the Kalachevsky Forest District. Voronezh, 2019. 242 p. (In Russ.).

9. Лотова Л.И. Ботаника. Морфология и анатомия высших растений. М.: КомКнига, 2007. 512 с.

Lotova L.I. Botany. *Morphology and Anatomy of Higher Plants*. Moscow, KomKniga Publ., 2007. 512 p. (In Russ.).

10. Михин В.И. Лесомелиорация ландшафтов: моногр. Воронеж: ВГЛТА, 2006. 127 с. Mikhin V.I. *Forest Reclamation of Landscapes: Monograph*. Voronezh, VGLTA Publ., 2006. 127 p. (In Russ.).

11. Николаев В.А., Авессаломова И.А., Чижова В.П. Природно-антропогенные ландшафты: городские, рекреационные, садово-парковые. М.: Геогр. фак. МГУ, 2011. 112 с.

Nikolaev V.A., Avessalomova I.A., Chizhova V.P. *Natural and Anthropogenic Landscapes: Urban, Recreational, Garden and Park*. Moscow, MSU Publ., 2011. 112 p. (In Russ.).

12. Рысин Л.П., Рысин С.Л. Методика оценки последствий рекреационного лесопользования // Лесн. вестн. 2000. № 6. С. 56–59.

Rysin L.P., Rysin S.L. Methodology for Assessing the Effects of Recreational Forest Management. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2000, no. 6, pp. 56–59. (In Russ.).

13. Савельева Л.С. Устойчивость деревьев и кустарников в защитных лесных насаждениях. М.: Лесн. пром-сть, 1975. 168 с.

Savel'eva L.S. *Stability of Trees and Shrubs in Protective Forest Plantations*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1975. 168 p. (In Russ.).

14. Стратегия развития защитного лесоразведения в Российской Федерации до 2025 года. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2015. 35 с.

Strategy for the Development of Protective Afforestation in the Russian Federation until 2025. Volgograd, VNIALMI Publ., 2015. 35 p. (In Russ.).

15. Borrelli P., Modugno S., Panagos P., Marchetti M., Schütt B., Montanarella L. Detection of Harvested Forest Areas in Italy Using Landsat Imagery. *Applied Geography*, 2014, vol. 48, pp. 102–111. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.01.005>

16. Edwards D.M., Jay M., Jensen F.S., Lucas B., Marzano M., Montagné C., Peace A., Weiss G. Public Preferences across Europe for Different Forest Stand Types as Sites for Recreation. *Ecology and Society*, 2012, vol. 17, no. 1, art. 27. <https://doi.org/10.5751/ES-04520-170127>

17. Laarman J.G., Sedjo R.A. *Global Forests*. New York, McGraw Hill College, 1992. 337 p.

18. Mansourian S., Vallauri D., Dudley N. *Forest Restoration in Landscapes*. New York, Springer, 2005. 438 p. <https://doi.org/10.1007/0-387-29112-1>

19. Martynova M., Sultanova R., Khanov D., Talipov E., Sazgutdinova R. Forest Management Based on the Principles of Multifunctional Forest Use. *Journal of Sustainable Forestry*, 2020, vol. 40, iss. 1, pp. 32–46. <https://doi.org/10.1080/10549811.2020.1734025>

20. Richardson S.D. *Forests and Forestry in China*. Washington D.C., Island Press, 1990. 352 p.

21. Stritzke S. *Seltene Obstarten im Garten*. Berlin, VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, 1973. 88 S. (In Ger.).

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest

Научная статья

УДК 581.524.2-271.171(470.54-25)

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-5-73-84

Расширение ареала *Cotoneaster lucidus* Schlecht. в лесопарках г. Екатеринбурга

Е.А. Тишкина^{1,2}✉, канд. с.-х. наук, науч. сотр., доц.; ResearcherID: [AAC-4442-2020](https://orcid.org/0000-0001-6315-2878),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6315-2878>

Л.А. Семкина^{1,2}, д-р биол. наук, вед. науч. сотр.; ResearcherID: [AAC-4433-2020](https://orcid.org/0000-0003-2351-3258),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2351-3258>

И.В. Шевелина², канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [ABH-5277-2020](https://orcid.org/0000-0001-8352-558X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8352-558X>

¹Ботанический сад УрО РАН, ул. 8 Марта, д. 202 а, г. Екатеринбург, Россия, 620014; Elena.MLOB1@yandex.ru✉, lidia.semkina@botgard.uran.ru

²Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; Elena.MLOB1@yandex.ru, lidia.semkina@botgard.uran.ru, shevelinaiv@m.usfeu.ru

Поступила в редакцию 29.10.20 / Одобрена после рецензирования 06.02.21 / Принята к печати 10.02.21

Аннотация. Кизильник блестящий – *Cotoneaster lucidus* Schlecht. – одно из древнейших растений. Он возник в Юго-Восточной Азии и имеет много примитивных признаков. Стратегия выживания этого вида удивительна. Его интродукционный ареал простирается на всей территории Евразии. Кизильник активно внедрился во все лесопарки г. Екатеринбурга. Его распространению способствовало наличие съедобных, долгосохраняющихся плодов на побегах, которые стали кормовой базой многих видов птиц. Цель исследования – анализ закономерностей распространения и особенностей экологической приуроченности *Cotoneaster lucidus* в лесопарках г. Екатеринбурга. Обследовано 15 лесопарков, и в 11 он встречается в подлеске. Работы выполнены на основе материалов лесоустройства. Учет локальных местообитаний проведен в 4 лесопарках: Санаторном, Уктусском, Шарташском и им. Лесоводов России, – наиболее посещаемых населением города. Оптимальными условиями для произрастания кизильника являются сосняки разнотравные с полнотой древостоя 0,7–0,8. Подходят также спелые насаждения 1-го класса устойчивости. В Центральном лесопарке наиболее высокая встречаемость кизильника – 7 % от общей площади лесопарка. Плотность кизильника увеличивается с полнотой древостоя от 320 до 1140 особей. При полноте 0,3–0,5 количество особей на единицу площади уменьшается, а при 0,1–0,2 кизильник исчезает совсем в результате увеличения антропогенной нагрузки и поступления света в избыточном количестве. Биоэкологическая особенность *Cotoneaster lucidus* – это высокая теневыносливость. Морфометрические параметры растений в исследуемых лесопарках зависят от полноты древесного полога, максимальные показатели выявлены у экземпляров в Санаторном лесопарке, где распределение кустов редкое при полноте древостоя 0,7. Установлена положительная корреляция высоты растений с площадью проекции и объемом кроны. Пространственное размещение особей варьирует в зависимости от лесопарка и его посещаемости людьми. Так, в Шарташском лесопарке 60,4 % кизильников сосредоточены в густом подлеске, а в Уктусском – 66,7 % встречается в редком подлеске. Во всех лесопарках присутствуют иматурные особи, что свидетельствует об успешной натурализации и высоком потенциале вида.



Ключевые слова: *Cotoneaster lucidus*, кизильник блестящий, инвазия, лесопарки, экологические особенности кизильника, биологические особенности кизильника, местообитание кизильника, Екатеринбург

Для цитирования: Тишкина Е.А., Семкина Л.А., Шевелина И.В. Расширение ареала *Cotoneaster lucidus* Schlecht. в лесопарках г. Екатеринбурга // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 5. С. 73–84. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-73-84>

Original article

Range Expansion of *Cotoneaster lucidus* Schlecht. in Forest Parks of Yekaterinburg

Elena A. Tishkina^{1,2✉}, Candidate of Agriculture, Research Scientist, Assoc. Prof.;
ResearcherID: [AAC-4442-2020](https://orcid.org/0000-0001-6315-2878), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6315-2878>

Lidia A. Semkina^{1,2}, Doctor of Biology, Leading Research Scientist;
ResearcherID: [AAC-4433-2020](https://orcid.org/0000-0003-2351-3258), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2351-3258>

Irina V. Shevelina², Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [ABH-5277-2020](https://orcid.org/0000-0001-8352-558X),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8352-558X>

¹Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. 8 Marta, 202 a, Yekaterinburg, 620014, Russian Federation; Elena.MLOB1@yandex.ru[✉], lidia.semkina@botgard.uran.ru

²Ural State Forest Engineering University, ul. Sibirskiy trakt, 37, Yekaterinburg, 620100; Elena.MLOB1@yandex.ru, lidia.semkina@botgard.uran.ru, shevelinaiv@m.usfeu.ru

Received on October 29, 2020 / Approved after reviewing on February 6, 2021 / Accepted on February 10, 2021

Abstract. Shiny cotoneaster (*Cotoneaster lucidus* Schlecht.) is one of the oldest plants. It originated in Southeast Asia and has many primitive traits. Its survival strategy is fascinating. Its introduction range extends throughout Eurasia. The cotoneaster has been actively introduced to all forest parks and city forests around Yekaterinburg. Its spread was facilitated by the presence of edible, long-preserved fruits on the shoots, which were the food supply for many bird species. The research aims at analyzing the distribution patterns and features of ecological occurrence of *Cotoneaster lucidus* in the forest parks of Yekaterinburg. There were 15 forest parks surveyed, and in 11 of them it is found in the undergrowth. The studies were carried out on the basis of forest inventory materials. Local habitats were monitored in four forest parks most visited by the population of the city: Sanatory Forest Park, Uktusskiy Forest Park, Park named after Foresters of Russia, Shartashskaya Forest Park. Optimal environment for cotoneaster growth are mixed herbs pine forests with stand density of 0.7–0.8. Mature stands of the 1st resistance class are also appropriate. The highest occurrence of cotoneaster in the Central Forest Park is 7 % of the total area of the forest park. The density of cotoneaster increases with increasing stand density from 320 to 1,140 individuals. At a density of 0.3–0.5 the number of individuals per unit area decreases, and at 0.1–0.2 cotoneaster disappears completely as a result of increased anthropogenic load and the inflow of light in excessive amounts. High shade tolerance is a bioecological feature of *Cotoneaster lucidus*. Morphometric parameters of plants in the studied forest parks depend on the density of the tree canopy; the maximum values were found for specimens in the Sanatory Forest Park, where the distribution of shrubs is rare with a density of the stand of 0.7. A positive correlation of plant height with projection area and crown volume was

found. The spatial distribution of individuals varies depending on the forest park and its attendance by people. For instance, in the Shartashsky Forest Park 60.4 % of cotoneasters are located in dense undergrowth, and in the Uktuskiy Forest Park 66.7 % are found in sparse undergrowth. Immature individuals are present in all of the Forest Parks, which indicates successful naturalization and high potential of the species.

Keywords: *Cotoneaster lucidus*, cotoneaster, invasion, forest parks, cotoneaster ecological features, cotoneaster biological features, cotoneaster habitat, Yekaterinburg

For citation: Tishkina E.A., Semkina L.A., Shevelina I.V. Range Expansion of *Cotoneaster lucidus* Schlecht. in Forest Parks of Yekaterinburg. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 5, pp. 73–84. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-73-84>

Введение

Род *Cotoneaster* включает в себя около 100 видов, произрастающих в Евразии (кроме Японии) [20, 22, 25–28], особенно в Гималаях, Китае и в Северной Африке – по данным Замятнина Б.Н. [7] – 60 видов. На территории России присутствует 11 видов кизильника, в азиатской России – 5 [4, 9], на Урале – 3 [8], в Крыму и на Кавказе – 3 и интродуцировано 38 видов. Кизильник, возникший в странах «живых ископаемых» – Юго-Восточной Азии, Гималаях и Юньнани [17] – одно из древнейших растений. Достоверно установлено, что *Cotoneaster* есть в третичных отложениях [10]. Кизильнику присущи все примитивные признаки – листья простые, цельные, кожистые, очередные с сетчатым жилкованием, цветки раздельнолепестные, ему свойственен апомиксис [23]. Примером восстановления ареала в Европе является форзиция европейская [24]. *Cotoneaster* – это прямостоячий кустарник 2–3 м высотой, в благоприятных условиях Ботанического сада Дублина (Ирландия) он растет в виде дерева, достигая 6–7 м в высоту.

Кизильник блестящий (*Cotoneaster lucidus* Schlecht.) является одним из самых распространенных в культуре, его можно встретить в озеленении практически повсеместно, как в нашей стране, так и за ее пределами. В природе он присутствует лишь на небольшой территории в Забайкалье, где в светлых лесах из лиственницы его можно обнаружить в подлеске среди кустарников. Кизильник блестящий произрастает на галечниках речных долин, а иногда высоко взбирается по скалистым склонам. К почве он требователен, довольно зимостоек, засухоустойчив и газоустойчив [7].

В лесопарковой зоне г. Екатеринбурга *Cotoneaster lucidus* встречается как натурализовавшийся интродуцент в различных формах насаждений (одиночные посадки, бордюры, лесные культуры) [12]. Некоторые исследователи считают его инвазионным видом, внедрившимся в лесопарки города [3, 18].

Цель исследования – анализ закономерностей распространения и особенностей экологической приуроченности *Cotoneaster lucidus* в лесопарках г. Екатеринбурга.

Объекты и методы исследования

Согласно ботанико-географическому районированию Свердловской области, г. Екатеринбург расположен в южнотаежной подзоне бореально-лесной зоны. В растительных сообществах округа преобладают сосновые с лиственницей, травяные, травяно-кустарниковые и зеленомошные типы леса [11]

на дерново-подзолистых почвах и буроземах. Территория города сильно загрязнена из-за большого числа промышленных предприятий и высокой плотности автотранспортной сети [2, 16]. Тем не менее г. Екатеринбург является одним из самых зеленых городов Российской Федерации. Вокруг него расположено широкое кольцо зеленых насаждений. В пределах городской застройки насчитывается 15 лесопарков [19].

Исследования проведены на основе материалов лесоустройства в 11 лесопарках, в которых произрастает кизильник блестящий: Калиновском, Карасье-Озерском, Шувакишском, им. Лесоводов России, Нижне-Исетском, Южном, Санаторном, Уктусском, Центральном, Шарташском и Юго-Западном. Для каждого таксационного выдела наряду с обычной таксацией была выполнена ландшафтная, позволившая определить ландшафтно-эстетические и санитарно-гигиенические характеристики насаждений: тип ландшафта, класс эстетической оценки, балл рекреационной оценки, класс устойчивости и стадию рекреационной дигрессии [6]. Для насаждений в городских лесах одним из важных ландшафтных показателей является класс устойчивости. Он характеризует способность насаждений противодействовать неблагоприятным факторам, способным привести как к преждевременному распаду, так и к смене пород. В целях определения данного показателя, который устанавливается по следующим критериям: по интенсивности роста и развития составляющих насаждение деревьев, их морфологическим признакам, по количественным и качественным показателям подроста, подлеска, живого напочвенного покрова, по состоянию почвы, – в ландшафтной таксации применяется 4-балльная шкала устойчивости насаждений. Согласно лесоустроительной инструкции [13], при описании подлеска указываются основные виды кустарников, их густота (количество на 1 га). Для оценки густоты подлеска принимаются следующие нормативы: густой – более 5 тыс. растений на 1 га; средней густоты – 2–5 тыс. и редкий – до 2 тыс.

Учет локальных местообитаний кизильника выполнен в 4 лесопарках: Санаторном, Уктусском, Шарташском и им. Лесоводов России. Заложено 12 временных пробных площадей [1]. На каждой проводили замеры высоты и диаметров во взаимоперпендикулярных направлениях у 360 особей.

Результаты исследования и их обсуждение

Подлесок лесопарков Екатеринбурга сильно трансформирован по видовому составу [3]. Большинство адвентивных древесных видов используются в озеленении [14] и высажены в лесопарках в 1970–1980-х гг. [15]. Посадки – основной путь проникновения кизильника блестящего в лесопарки в составе искусственных насаждений вдоль дорожек, возле оборудованных зон отдыха. Дальнейшее расселение вида в лесопарках осуществляют птицы, при этом семена через пищеварительный тракт подвергаются стратификации и скарификации, что ускоряет процесс прорастания семян, в то время как их естественная всхожесть крайне низкая (28 %). Головатин М.Г. [5] приводит данные по использованию в лесопарках ягод как кормовой базы зябликом *Fringilla coelebs*, рябинником *Turdus pilaris*, садовой славкой *Sylvia borin*, зеленой пеночкой *Phylloscopus trochiloides*, садовой камышевкой *Acrocephalus dumetorum* и большой синицей *Parus major*. В горных районах центральной Аргентины исследо-

ватели при изучении плодов *Cotoneaster franchetii* отметили важную роль птиц в распространении растений [21]. Лесопарковая зона г. Екатеринбурга – один из ярких примеров тесной связи консумента с узким кругом продуцентов при формировании искусственного ареала кизильника блестящего.

Кизильник блестящий встречается в 11 из 15 лесопарков г. Екатеринбурга на площади 396,8 га (рис. 1). Подсчитан процент встречаемости от общей площади. По мере уменьшения долевого участия кизильника лесопарки распределены в следующем порядке: максимально (7 %) – в Центральном лесопарке, далее – в Шарташском, Нижне-Исетском, Южном, им. Лесоводов России и Калиновском лесопарках; минимальную площадь кизильник занимает в Шувакишском и Санаторном лесопарках (0,1 %).

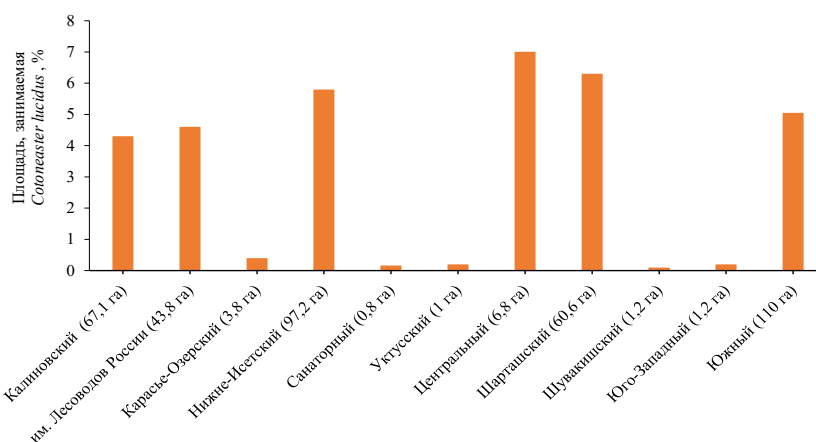


Рис. 1. Площадь насаждений с участием *Cotoneaster lucidus* в лесопарках г. Екатеринбурга

Fig. 1. Area of plantations with *Cotoneaster lucidus* participation in the forest parks of Yekaterinburg

Кизильник встречается исключительно как подлесочный вид в составе определенного типа леса, выполняя роль лесного микроландшафта, но чаще всего в сосняках разнотравных и ягодниковых (рис. 2). Приуроченность кизильника блестящего к соснякам разнотравным от 40,87 до 100 % лесопокрытой площади (за исключением Шарташского и Калиновского лесопарков) позволяет считать экологическим оптимумом для его существования именно этот тип леса, обеспечивающий кизильнику фитоценологическую защиту через регуляцию светового и водного режимов, почвенного питания. Еще одной биоэкологической особенностью *Cotoneaster lucidus* является его высокая теневыносливость. Для произрастания вида предпочтительна полнота соснового древостоя 0,7–0,8 (табл. 1).

С увеличением полноты древостоя с 0,6 до 0,8 растет и плотность кизильника – от 320 до 1140 особей ($r = 0,92$, $p < 0,05$) (табл. 2). При полноте 0,3–0,5 количество особей на единицу площади уменьшается, а при 0,1–0,2 кизильник исчезает совсем (табл. 1). Плотность расселения кизильника зависит и от возрастных категорий лесных насаждений (рис. 3). Местообитания кизильника сосредоточены преимущественно в спелых и приспевающих (32,7–47,4 %), высокобонитетных (Ia – 29,5 %, I – 16,7 % и II – 41,6 %) сосновых насаждениях.

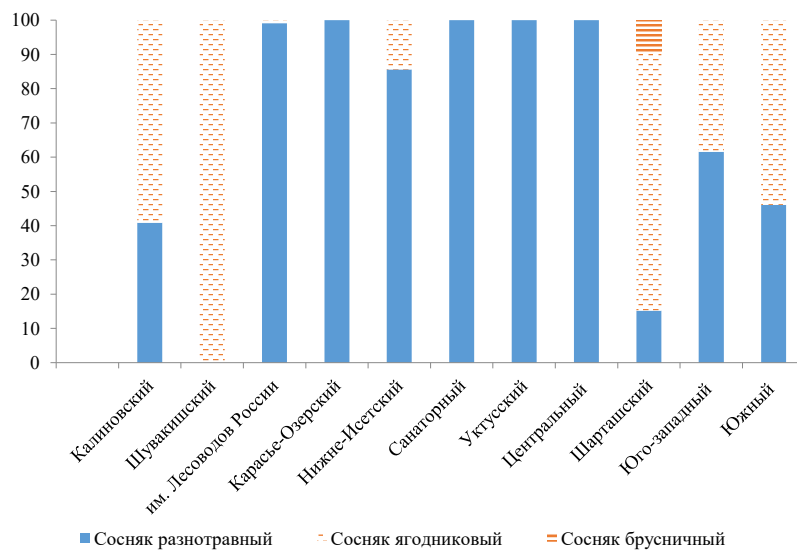


Рис. 2. Распределение насаждений (%) с участием *Cotoneaster lucidus* в лесопарках г. Екатеринбурга по типам леса

Fig. 2. Distribution of plantations (%) with *Cotoneaster lucidus* participation in the forest parks of Yekaterinburg by forest types

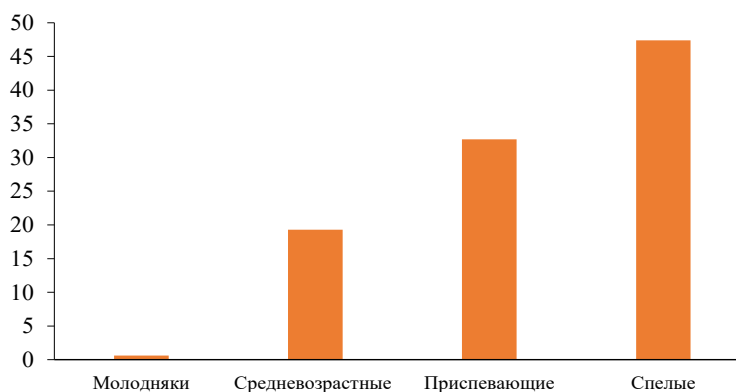


Рис. 3. Площади (%) насаждений с участием *Cotoneaster lucidus* по группам возраста насаждений

Fig. 3. Areas (%) of pine plantations with *Cotoneaster lucidus* participation by age groups of plantations

Наименьшая площадь с участием кизильника выявлена в молодняках (0,6 %). Пространственное размещение особей варьирует в зависимости от лесопарка и его посещаемости людьми. Так, в Шарташском лесопарке 60,4 % особей сосредоточены в густом подлеске, 20,8 % – в редком и 18,8 % – в среднем. В Уктусском лесопарке противоположная ситуация: 66,7 % особей встречаются в редком подлеске, а 33,3 % – в среднем. В целом по лесопаркам пространственное распределение следующее: 28,4 % кизильников – в густом, 36,3 % – в среднем и 35,3 % – в редком подлеске.

Таблица 2

Характеристика местообитаний *Cotoneaster lucidus* Schlecht.
Characteristics of the habitats of *Cotoneaster lucidus* Schlecht.

Фрагмент местообитания	Тип леса	Древостой		Фрагменты местообитаний (по 0,09 га)			
		состав	полнота древесного полога	плотность особей на 1 га	высота, м	площадь проекции кроны, м ²	морфометрические параметры
Уктусский лесопарк							
1	Сосняк разнотравный	9С1Б	0,5	404	1,0±0,08	1,42±0,32	0,67±0,17
2	Сосняк ягодниковый	8С2Б	0,4	632	0,98±0,10	0,98±0,32	0,54±0,21
3	Березняк разнотравный	7Б3С	0,2	414	1,18±0,04	0,96±0,09	0,40±0,05
4	Сосняк разнотравный	6С4Б	0,6	478	1,38±0,05	1,94±0,32	0,94±0,18
			X ± mх	482	1,13±0,06	1,32±0,26	0,63±0,15
Санаторный лесопарк							
5	Сосняк разнотравный	9С1Б	0,7	320	1,94±0,08	2,66±0,15	2,11±0,05
Шартаиский лесопарк							
6	Сосняк разнотравный	9С1Б	0,8	858	1,47±0,09	1,35±0,25	0,84±0,19
7	Сосняк разнотравный	10С	0,7	1140	1,95±0,08	2,66±0,65	2,12±0,71
			X ± mх	999	1,71±0,08	2,0±0,45	1,48±0,45
Лесопарк им. Лесоводов России							
8	Сосняк черничный	9С1Б	0,6	650	1,46±0,13	2,26±0,32	1,28±0,24
9	Сосняк разнотравный	8С2Б	0,7	424	0,63±0,08	0,22±0,09	0,10±0,05
10	Сосняк черничный	6С4Б	0,6	712	0,97±0,06	0,17±0,03	0,07±0,01
11	Сосняк черничный	5С5Б	0,6	404	1,60±0,09	4,28±0,70	2,74±0,57
12	Сосняк разнотравный	6С4Е	0,7	350	0,97±0,06	0,15±0,03	0,06±0,01
			X ± mх	508	1,12±0,08	1,41±0,23	0,85±0,17

Морфометрические параметры растений в исследуемых лесопарках также зависят от полноты древесного полога. Максимальные показатели высоты (1,94 м) выявлены у особей в Санаторном лесопарке с максимальными площадью проекции и объемом кроны, где распределение кустов довольно редкое, при полноте древостоя 0,7.

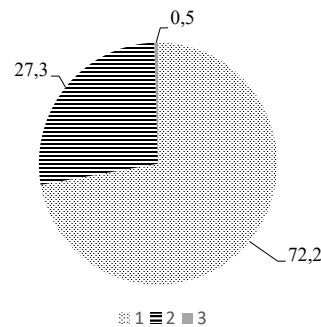
Установлена положительная корреляция высоты растений с площадью проекции ($r = 0,97$, $p < 0,05$) и объемом кроны ($r = 0,97$, $p < 0,05$). Во всех лесопарках встречаются иматурные особи, что свидетельствует об успешной натурализации и высоком потенциале вида.

При анализе ландшафтно-эстетических характеристик насаждений лесопарков г. Екатеринбурга выявлено, что кизильник селится преимущественно в древостоях с закрытым типом ландшафта. Это чистые или смешанные насаждения с относительной полнотой выше 0,7. Кизильник гармонично вписывается в ландшафты лесопарков, характеризующиеся высокими (1-й класс эстетической оценки – 58,8 %) и средними (2-й класс – 40,8 %) декоративно-эстетическими свойствами: особенно осенью, когда листья раскрашиваются ярким пламенем.

Распределение площади насаждений лесопарков с участием кизильника по классам устойчивости представлено на рис. 4, который подтверждает, что данный вид произрастает преимущественно в насаждениях 1-го класса устойчивости (72,2 %) и 1-й стадии рекреационной дигрессии (60,9 %).

Рис. 4. Распределение площади насаждений лесопарков с участием *Cotoneaster lucidus* по классам устойчивости (1, 2, 3)

Fig. 4. Area distribution of forest park plantations with *Cotoneaster lucidus* participation by stability classes (1, 2, 3)



Заключение

Установлено, что экологическим оптимумом произрастания *Cotoneaster lucidus* являются сосняки разнотравные при полноте древостоя 0,7–0,8, спелые и приспевающие, 1-го класса устойчивости. Средняя высота кизильника по всем лесопаркам составляет 1,5 м, при этом плотность расположения особей становится больше с увеличением полноты древостоя. Данный вид активно занимает свою экологическую нишу, внедряясь в лесопарки и городские леса, восстанавливая таким образом свой доледниковый ареал.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Андреева Е.Н., Баккал И.Ю., Горшков В.В., Лянгузова И.В., Мазная Е.А., Нешатаев В.Ю., Нешатаева В.Ю., Ставрова Н.И., Ярмишко В.Т., Ярмишко М.А. Методы изучения лесных сообществ. СПб.: СПбГУ, 2002. 240 с.

Andreeva E.N., Bakkal I.Yu., Gorshkov V.V., Lyanguzova I.V., Maznaya E.A., Neshataev V.Yu., Neshataeva V.Yu., Stavrova N.I., Yarmishko V.T., Yarmishko M.A. *Methods of Studying Forest Communities*. Saint Petersburg, SPbU Publ., 2002. 240 p. (In Russ.).

2. Антропов К.М., Вараксин А.Н. Оценка загрязнения атмосферного воздуха г. Екатеринбурга диоксидом азота методом Land Use Regression // Экол. системы и приборы. 2011. № 8. С. 47–54.

Antropov K.M., Varaksin A.N. Assessing Nitrogen Dioxide Air Pollution in Ekaterinburg Land Use Regression Model. *Ecological Systems and Devices*, 2011, no. 8, pp. 47–54. (In Russ.).

3. Веселкин Д.В., Коржиневская А.А., Подгаевская Е.Н. Состав и численность адвентивных и инвазивных кустарников и деревьев подлеска в лесопарках г. Екатеринбурга // Вестн. ТГУ. Биология. 2018. № 42. С. 102–118.

Veselkin D.V., Korzhinevskaya A.A., Podgayevskaya E.N. The Species Composition and Abundance of Alien and Invasive Understory Shrubs and Trees in Urban Forests of Yekaterinburg. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Biologiya* = Tomsk State University Journal of Biology, 2018, no. 42, pp. 102–118. (In Russ.). <https://doi.org/10.17223/19988591/42/5>

4. Встовская Т.Н. Древесные растения – интродуценты Сибири: *Abelia-Ligustrum*. Новосибирск: Наука, 1985. 278 с.

Vstovskaya T.N. *Woody Plants – Introduced Species of Siberia: Abelia-Ligustrum*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985. 278 p. (In Russ.).

5. Головатин М.Г., Ляхов А.Г. Орнитокомплексы лесопарков Екатеринбурга // Рус. орнитол. журн. 2013. Т. 22, вып. 858. С. 709–716.

Golovatin M.G., Lyakhov A.G. Ornithocomplexes of Forest Parks in Yekaterinburg. *The Russian Journal of Ornithology*, 2013, vol. 22, iss. 858, pp. 709–716. (In Russ.).

6. Гусев Н.Н., Синецын С.Г., Сухих В.И., Букин Н.И. Лесоустройство в СССР. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 328 с.

Gusev N.N., Sinitsyn S.G., Sukhikh V.I., Bukin N.I. *Forest Management in the USSR*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1981. 328 p. (In Russ.).

7. Деревья и кустарники СССР: Дикорастущие, культивируемые и перспективные для интродукции / под ред. С.Я. Соколова, Б.К. Шишкина; АН СССР. Ботан. ин-т им. В.Л. Комарова. М.; Л.: АН СССР, 1949–1965. Т. 3: Покрытосеменные. Семейства троходендроновые – розоцветные. 1954. 872 с.

Angiosperms. *Trochodendraceae – Rosaceae Families*. Vol. 3. *Trees and Shrubs of the USSR: Wild, Cultivated and Promising for Introduction*. Ed. by S.Ya. Sokolov, B.K. Shishkin. Moscow, AN SSSR Publ., 1954. 872 p.

8. Князев М.С. Род *Cotoneaster (Rosaceae)* на Урале // Ботан. журн. 2007. Т. 92, № 3. С. 420–428.

Knyazev M.S. The Genus *Cotoneaster (Rosaceae)* in the Urals. *Botanicheskii Zhurnal*, 2007, vol. 92, no. 3, pp. 420–428. (In Russ.).

9. Коропачинский И.Ю., Встовская Т.Н. Древесные растения Азиатской России. Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2012. 707 с.

Koropachinskiy I.Yu., Vstovskaya T.N. *Woody Plants of Asian Russia*. Novosibirsk, Geo Publ., 2012. 707 p. (In Russ.).

10. Криштофович А.Н. Палеоботаника. Л.: Гостоптехиздат, 1957. 650 с.

Krishtafovich A.N. *Palaeobotanica*. Leningrad, Gostoptehizdat Publ., 1957. 650 p. (In Russ.).

11. Куликов П.В., Золотарева Н.В., Подгаевская Е.Н. Эндемичные растения Урала во флоре Свердловской области. Екатеринбург: Гошицкий, 2013. 610 с.

Kulikov P.V., Zolotareva N.V., Podgaevskaya E.N. *Endemic Plants of the Urals in the Flora of the Sverdlovsk Region*. Yekaterinburg, Goshchitskiy Publ., 2013. 610 p. (In Russ.).

12. Ладейщикова Г.В., Петров А.П. Интродуценты в лесопарковой зоне г. Екатеринбурга // Альманах современной науки и образования. 2008. № 11. С. 83–86.

Ladeyshchikova G.V., Petrov A.P. Introduced Species in the Forest Park Area of Yekaterinburg. *Al'manakh sovremennoy nauki i obrazovaniya*, 2008, no. 11, pp. 83–86. (In Russ.).

13. Лесостроительная инструкция: утв. приказом Минприроды России от 29 марта 2018 г. № 122: зарегистрировано в Мин-ве юстиции РФ 20 апр. 2018 г., № 50859. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/542621790> (дата обращения: 29.08.22).

Forest Management Instruction: Approved by the Order No. 122 of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation Dated March 29, 2018: Registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on April 20, 2018, Registration No. 50859. (In Russ.).

14. Мамаев С.А. Определитель деревьев и кустарников Урала. Местные и интродуцированные виды. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 260 с.

Мамаев S.A. *Identification Guide of Trees and Shrubs of the Urals. Native and Introduced Species*. Yekaterinburg, UB RAS Publ., 2000. 260 p. (In Russ.).

15. Петров А.П., Ладейщикова Г.В., Зотеева Е.А. Дигрессия фитоценозов и натурализация древесных растений в лесопарковой зоне г. Екатеринбурга // Ботан. исследования на Урале. Пермь: Перм. гос. ун-т, 2009. С. 279–281.

Petrov A.P., Ladeyshchikova G.V., Zoteeva E.A. Digression of Phytocenoses and Naturalization of Woody Plants in the Forest Park Zone of Yekaterinburg. *Botanical Studies in the Urals*. Perm, PSU Publ., 2009, pp. 279–281. (In Russ.).

16. Стурман В.И. Природные и техногенные факторы загрязнения атмосферного воздуха российских городов // Вестн. Удмурт. ун-та. Сер.: Биология. Науки о Земле. 2008. Вып. 2. С. 15–29.

Sturman V.I. Natural and Technogenic Factors of Air Pollution in Russian Cities. *Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences*, 2008, iss. 2, pp. 15–29. (In Russ.).

17. Тахтаджян А.Л. Происхождение покрытосеменных растений. М.: Высш. шк., 1961. 132 с.

Tahtadzhyan A.L. *The Origin of Angiosperms*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1961. 132 p. (In Russ.).

18. Третьякова А.С. Закономерности распределения чужеродных растений в антропогенных местообитаниях Свердловской области // Рос. Журн. Биол. Инвазий. 2015. № 4. С. 118–128.

Tretyakova A.S. Regularities of Distribution of Alien Plants in Anthropogenous Habitats of Sverdlovsk Oblast. *Russian Journal of Biological Invasions*, 2015, no. 4, pp. 118–128. (In Russ.).

19. Шевелина И.В., Нагимов З.Я., Метелев Д.В. Характеристика лесного фонда зеленой зоны в пределах муниципального образования «г. Екатеринбург» // Современ. проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. Режим доступа: <http://science-education.ru/article/view?id=18547> (дата обращения: 29.08.22).

Shevelina I.V., Nagimov Z.Ya., Metelev D.V. Characteristic of the Forest Fund of the Urban Forest Zone of Municipal Unit “City of Yekaterinburg”. *Modern problems of science and education*, 2015, no. 1-1. (In Russ.).

20. Carpenter K.J. Stomatal Architecture and Evolution in Basal Angiosperms. *American Journal of Botany*, 2005, vol. 92, iss. 10, pp. 1595–1615. <https://doi.org/10.3732/ajb.92.10.1595>

21. Díaz Velez M.C., Sérsic A.N., Traveset A., Paiaro V. The Role of Frugivorous Birds in Fruit Removal and Seed Germination of the Invasive Alien *Cotoneaster franchetii* in Central Argentina. *Austral Ecology*, 2018, vol. 43, iss. 5, pp. 558–566. <https://doi.org/10.1111/aec.12592>
22. Dickoré W.B., Kasperek G. Species of *Cotoneaster* (*Rosaceae*, *Maloideae*) Indigenous to, Naturalising or Commonly Cultivated in Central Europe. *Willdenowia*, 2010, vol. 40(1), pp. 13–45. <https://doi.org/10.3372/wi.40.40102>
23. Hylmö B., Fryer J. *Cotoneasters in Europe*. *Acta Botanica Fennica*, 1999, vol. 162, pp. 179–184.
24. Markgraf Fr. *Forsythia europaea* und die *Forsythien* Asiens. *Mitteilungen der Deutschen dendrologischen gesellschaft*, 1930, Nr. 42, Ss. 1–12. (In Ger.).
25. Potter D., Eriksson T., Evans R.C., Oh S., Smedmark J.E.E., Morgan D.R., Kerr M., Robertson K.R., Arsenault M., Dickinson T.A., Campbell C.S. Phylogeny and Classification of *Rosaceae*. *Plant Systematics and Evolution*, 2007, vol. 266, pp. 5–43. <https://doi.org/10.1007/s00606-007-0539-9>
26. Sennikov A. Fryer J. & Hylmö B. *Cotoneasters: A Comprehensive Guide to Shrubs for Flowers, Fruit, and Foliage*. *Nordic Journal of Botany*, 2010, vol. 28, iss. 4, pp. 509–512. <https://doi.org/10.1111/j.1756-1051.2009.00639.x>
27. Sennikov A. Proposal to Conserve the Name *Mespilus tomentosa* (*Cotoneaster tomentosus*) against *Mespilus orientalis* (*Rosaceae*). *Taxon*, 2011 vol. 60, iss. 2, p. 606. <https://doi.org/10.1002/tax.602045>
28. Sennikov A.N., Somlyay L. Atlas Florae Europaeae Notes 17: Typification of *Cotoneaster tomentosus* (*Rosaceae*) and Its Synonyms. *Taxon*, 2011, vol. 60, iss. 2, pp. 579–584. <https://doi.org/10.1002/tax.602026>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest



Научная статья

УДК 629.11.02/.098

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-5-85-99

Компьютерное моделирование работы рекуперативного поворотного коникового устройства лесовозного тягача с прицепом-ропуском

В.И. Посметьев, *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: [Q-1411-2015](https://orcid.org/0000-0001-9878-7451)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>

В.О. Никонов[✉], *канд. техн. наук, доц.*; *ResearcherID: [N-3510-2019](https://orcid.org/0000-0002-7380-9180)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7380-9180>

А.Ю. Мануковский, *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: [AAR-1976-2020](https://orcid.org/0000-0003-4289-6581)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4289-6581>

В.В. Посметьев, *канд. физ.-мат. наук, доц.*; *ResearcherID: [Z-3736-2019](https://orcid.org/0000-0001-6622-5358)*,


ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6622-5358>

Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия, 394087; posmetyev@mail.ru, 8888nike8888@mail.ru[✉], mayu1964@mail.ru, victorvp@mail.ru

Поступила в редакцию 29.10.21 / Одобрена после рецензирования 03.02.22 / Принята к печати 06.02.22

Аннотация. Обоснована необходимость повышения эффективности вывозки длинномерных лесоматериалов лесовозными тягачами с прицепами-ропусками при их эксплуатации в условиях недостаточно обустроенных лесовозных дорог, характеризующихся наличием неровностей, дефектов, препятствий, а также частых поворотов, подъемов и спусков. В результате ранее выполненных исследований по разработке и оценке различных рекуперативных сцепных устройств для лесовозных автопоездов, функционирующих в сложных дорожных условиях, предложена оригинальная схема рекуперативного поворотного коникового устройства для лесовозного тягача с прицепом-ропуском. В целях выявления зависимостей изменения во времени таких показателей эффективности работы коникового устройства, как рекуперированная мощность и горизонтальное ускорение пакета длинномерных лесоматериалов, а также установления закономерностей влияния на эти показатели исследуемых высот неровностей опорной поверхности лесовозной дороги, скорости движения лесовозного автопоезда и внутреннего диаметра продольных и поперечных гидроцилиндров рекуперативного устройства разработана компьютерная программа. Выявлено, что оснащение лесовозного автопоезда предлагаемым рекуперативным поворотным кониковым устройством имеет обоснованную целесообразность при вывозке длинномерных лесоматериалов, особенно в условиях недостаточно обустроенных лесовозных дорог. С увеличением скорости лесовозного автопоезда при его движении в сложных дорожных условиях с 10 до 60 км/ч существенно растет рекуперированная мощность – с 3 до 24 кВт, а также изменяется с 0,4 до 2,3 м/с² горизонтальное ускорение пакета длинномерных лесоматериалов относительно лесовозного тягача. Установлено, оптимальные

© Посметьев В.И., Никонов В.О., Мануковский А.Ю., Посметьев В.В., 2022

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

диаметры поперечных и продольных гидроцилиндров рекуперативного поворотного коникового устройства, обеспечивающие максимальную рекуперлируемую мощность 6,7 кВт и среднее горизонтальное ускорение пакета длинномерных лесоматериалов 1 м/с², составляют 50 мм. Полученные результаты могут быть полезны научно-исследовательским и проектно-конструкторским организациям, занимающимся дальнейшим усовершенствованием рекуперативных устройств аналогичного типа, применяемых для лесовозного автомобильного транспорта.

Ключевые слова: лесовозный тягач, лесовозный автопоезд, расход топлива лесовозным тягачем, поворотное кониковое устройство, лесовозная дорога, горизонтальное ускорение лесовозного автопоезда, компьютерная программа, компьютерное моделирование, прицеп-ропуск, рекуперация энергии

Для цитирования: Посметьев В.И., Никонов В.О., Мануковский А.Ю., Посметьев В.В. Компьютерное моделирование работы рекуперативного поворотного коникового устройства лесовозного тягача с прицепом-ропуском // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 5. С. 85–99. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-85-99>

Original article

Computer Simulation of the Operation of the Recuperative Swivel Bunk Device of a Hauling Tractor with a Timber Drug

Valeryi I. Posmetyev, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [Q-1411-2015](https://orcid.org/0000-0001-9878-7451),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>

Vadim O. Nikonov[✉], Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [N-3510-2019](https://orcid.org/0000-0002-7380-9180),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7380-9180>

Andrey Yu. Manukovskii, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAR-1976-2020](https://orcid.org/0000-0003-4289-6581),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4289-6581>

Viktor V. Posmetyev, Candidate of Physics and Mathematics, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [Z-3736-2019](https://orcid.org/0000-0001-6622-5358), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6622-5358>

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, ul. Timiryazeva, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; posmetyev@mail.ru, 8888nike8888@mail.ru[✉], mayu1964@mail.ru, victorvpo@mail.ru

Received on October 29, 2021 / Approved after reviewing on February 3, 2022 / Accepted on February 6, 2022

Abstract. The article validates the necessity of increasing the transportation efficiency of long-cut timber (LCT) by hauling tractors with timber drugs during their operation in conditions of poorly equipped logging roads with the presence of irregularities, defects, barriers, as well as frequent turns, ascents and descents. An original scheme of a recuperative swivel bunk device (RSBD) for a hauling tractor (HT) with a timber drug (TD) is designed as a result of earlier research on development and evaluation of various recuperative coupling devices for logging trucks operating in difficult road conditions. A computer program has been developed in order to identify the dependences of change in time of such parameters of the bunk device efficiency as recoverable power and horizontal acceleration of an LCT bundle, as well as to determine the regularities of influence of the studied heights of the logging road bearing area, the driving speed of a logging truck and the inner diameter of longitudinal and transverse hydraulic cylinders of the recuperative device on these parameters. It has been found out that equipping a logging truck with the proposed RSBD is reasonable when LCT transporting,



especially in conditions of poorly equipped logging roads. With an increase in speed of the logging truck when it moves in difficult road conditions from 10 to 60 km/h recoverable power increases significantly from 3 to 24 kW, as well as the horizontal acceleration of the LCT bundle relative to HT changes from 0.4 to 2.3 m/s². It is found that the optimum diameters of transverse and longitudinal hydraulic cylinders of RSBD, providing the maximum recoverable power of 6.7 kW and the average horizontal acceleration of the LCT bundle of 1 m/s², is 50 mm. The results obtained can be useful to research and design organizations engaged in further improvement of recuperative devices of similar type used for timber road transport.

Keywords: hauling tractor, logging truck, fuel consumption of a logging truck, swivel bunk device, logging road, horizontal acceleration of a logging truck, computer program, computer simulation, timber drug, energy recovery

For citation: Posmetyev V.I., Nikonov V.O., Manukovskii A.Yu., Posmetyev V.V. Computer Simulation of the Operation of the Recuperative Swivel Bunk Device of a Hauling Tractor with a Timber Drug. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 5, pp. 85–99. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-85-99>

Введение

Лесной комплекс РФ, в состав которого входят лесное хозяйство и лесная промышленность, вносит значительный вклад в развитие экономики страны. Объем заготовленных в России лесоматериалов в 2019 г. составил 219 млн м³, а в 2020 г. – 217 млн м³. Наибольший процент затрат в технологическом процессе заготовки лесоматериалов приходится на их вывозку с лесосеки на нижние лесные склады лесозаготовительных предприятий. Доля лесоматериалов, вывозимых лесовозными автомобилями, составляет порядка 80 % от суммарного ежегодного объема лесоматериалов, вывозимых всеми видами лесовозного транспорта. В этой связи поиск путей, направленных на сокращение расходов при вывозке лесоматериалов лесовозным автомобильным транспортом, является актуальной задачей, решение которой позволит улучшить эффективность работы лесозаготовительных предприятий [4].

В качестве основного вида лесовозного автомобильного транспорта для вывозки длинномерных лесоматериалов (ДЛ) в виде хлыстов на крупных промышленных лесозаготовительных предприятиях используются лесовозные автопоезда (ЛА), состоящие из лесовозных тягачей (ЛТ) с прицепами-ропусками (ПР). Несмотря на преимущества ЛТ с ПР перед другими ЛА, основной их серьезный недостаток – несовершенство конструкции коникового устройства, устанавливаемого на раме ЛТ. Частые и резкие торможения ЛТ с ПР на прямых участках недостаточно обустроенных лесовозных дорог (ЛД), а также преодоление поворотов ЛА в сложных дорожных условиях сопровождаются возникновением значительных по величине и направлению сил инерции массы ПР с ДЛ. Воздействие этих сил на конструкцию поворотного коникового устройства в виде изгибающих и скручивающих моментов приводит к ухудшению плавности хода ЛТ с ПР, росту расхода топлива, снижению надежности ЛА за счет повышенного износа и деформации основных деталей коникового устройства [5].

Одним из перспективных научных направлений, позволяющих повысить эффективность ЛТ с ПР за счет сокращения расхода топлива, увеличения надежности и улучшения плавности хода ЛТ с ПР, является разработка и использование в конструкции поворотного коникового устройства recuperativ-

ных механизмов. Обзор научных работ зарубежных исследователей в области повышения эффективности работы автотранспортных средств за счет оснащения их рекуперативными механизмами, преобразующими, накапливающими и полезно использующими различные виды энергии, подтверждает актуальность данного научного направления [7–20].

Анализ недостатков и преимуществ существующих конструкций поворотных кониковых устройств ЛА, а также ранее выполненные авторами исследования по предварительной оценке различных рекуперативных сцепных устройств ЛА позволили разработать для ЛТ с ПР перспективную конструкцию рекуперативного поворотного коникового устройства (РПКУ) (рис. 1) [5, 6].

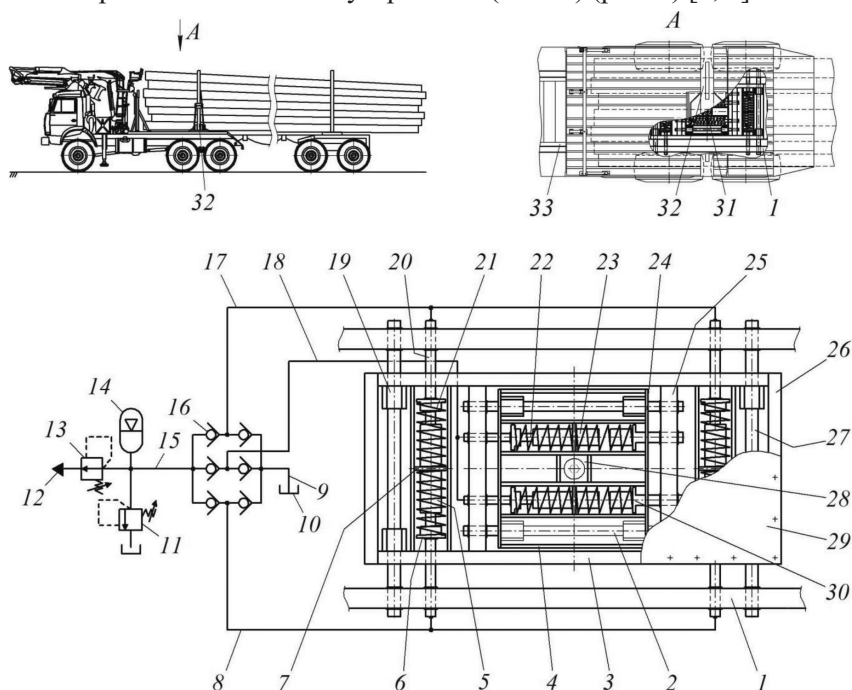


Рис. 1. Перспективная конструкция РПКУ ЛТ с ПР: 1, 33 – продольные лонжероны рамы лесовозной площадки и рамы ЛТ; 2, 3, 4, 22 – продольные швеллеры, стенки, направляющие оси и штоки; 5, 23 – гидроцилиндры двухстороннего и одностороннего действия; 6 – фланцы; 7 – распорки; 8, 17, 18 – гибкие трубопроводы; 9, 15 – всасывающий и напорный трубопроводы; 10 – гидробак; 11, 13 – регулируемые предохранительный и редуцирующий клапаны; 12 – порт подачи рабочей жидкости потребителю; 14 – пневмогидравлический аккумулятор; 16 – обратные клапаны; 19 – опоры; 20, 24–26, 27 – поперечные швеллеры, брусья, стенки, направляющие оси и штоки; 21 – пружины; 28 – траверса; 29 – крышка; 30 – задние фланцы; 31 – шкворень; 32 – поворотный коник

Fig. 1. Advanced design of RSBSD of HT with TD: 1, 33 – longitudinal longerons of the timber flatbed frame and the HT frame; 2, 3, 4, 22 – longitudinal channels, walls, axle guides and rods; 5, 23 – double-acting and single-acting hydraulic cylinders; 6 – flanges; 7 – spacers; 8, 17, 18 – flexible pipelines; 9, 15 – suction and pressure pipelines; 10 – hydraulic tank; 11, 13 – adjustable safety and pressure reducing valves; 12 – port for fluid supply to the consumer; 14 – pneumohydraulic accumulator; 16 – check valves; 19 – supports; 20, 24–26, 27 – transverse channels, walls, axle guides and rods; 21 – springs; 28 – traverse; 29 – cover; 30 – rear flanges; 31 – kingpin; 32 – swivel bunk

Функционирование разработанного РПКУ осуществляется при движении ЛТ с ПР и основывается на использовании кинетической энергии, образующейся при торможении ЛА от силы инерции массы ПР с ДЛ, как на прямом участке недостаточно обустроенной ЛД, так и при поворотах в сложных дорожных условиях. РПКУ может перемещаться в продольном и поперечном направлениях относительно оси ЛТ за счет имеющихся в конструкции направляющих и гидроцилиндров. Двигаясь в этих направлениях, РПКУ одновременно сглаживает нагрузки, передающиеся от сил инерции ПР с ДЛ, и преобразует кинетическую энергию в потенциальную энергию рабочей жидкости, которая благодаря наличию в рекуперативном гидроприводе пневмогидравлического аккумулятора накапливается и полезно используется при дальнейшей работе гидравлического манипулятора в процессе выполнения погрузочных и разгрузочных операций.

С целью предварительной оценки предлагаемого РПКУ ЛТ с ПР, а также ускорения работ по проектированию и изготовлению опытного образца РПКУ, который будет использован в дальнейших исследованиях, требуется на основе ранее разработанных авторами математических моделей движения ЛА по недостаточно обустроенным ЛД создать компьютерную программу для моделирования РПКУ ЛТ с ПР, позволяющую выявить зависимости влияния условий движения ЛА, параметров ЛД, основных конструктивных параметров РПКУ на рекуперированную мощность и горизонтальное ускорение пачки ДЛ относительно ЛТ. Кроме того, необходимо определить оптимальные диаметры продольных и поперечных гидроцилиндров разработанного РПКУ [4–6].

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является ЛТ с ПР, предметом – РПКУ. Для оценки потенциальной эффективности РПКУ ЛТ с ПР, определения оптимальных конструктивных параметров РПКУ, обеспечивающих наибольшую рекуперированную мощность, создана компьютерная программа на основе ранее разработанных авторами математических моделей движения ЛА по недостаточно обустроенным ЛД [1–3].

Перед созданием компьютерной программы была составлена математическая модель, описывающая движения в процессе вывозки лесоматериалов загруженного ДЛ ЛА, оснащенного РПКУ. При ее разработке применялись методы классической механики, а также выполнялось требование корректности представления движущихся в пространстве исследуемых тел. К ним относятся ЛТ, ПР, пакет ДЛ, подвеска, колеса, ЛД с заданными параметрами рельефа. ЛТ, ПР и пакет лесоматериалов в разработанной математической модели описаны как отдельные абсолютно твердые тела, контактирующие друг с другом при движении по ЛД. На рис. 2 приведена новая расчетная схема, которая использовалась для создания динамической модели ЛТ с ПР, отличающаяся от предыдущих оснащением ЛТ РПКУ. P – это точки, обозначающие пакет бревен Б1–Б6, роспуск Р1–Р3, кониковое устройство Т1–Т3, $c_{ли}$ и $d_{ли}$ – коэффициенты жесткости и демпфирования упруго-вязкого взаимодействия колеса с опорной поверхностью; z – вертикальная координата точки крепления колеса к корпусу. ЛТ, ПР и пакет ДЛ обладают соответствующими массами и моментами инерции m_T , m_P , m_B , J_T , J_P , J_B . Положение в пространстве этих объектов в разрабатываемой математической модели описывается декартовыми координатами их центров тяжести (x_T, y_T, z_T) , (x_P, y_P, z_P) и (x_B, y_B, z_B) и углами отклонения локальной системы координат от общей базовой $(\varphi_{xT}, \varphi_{yT}, \varphi_{zT})$, $(\varphi_{xP}, \varphi_{yP}, \varphi_{zP})$ и $(\varphi_{xB}, \varphi_{yB}, \varphi_{zB})$ [4–6]:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_k \frac{\partial^2 x_k}{\partial t^2} = \sum_{i=1}^3 F_{\text{Л}i}^x + \sum_{i=1}^3 F_{\text{П}i}^x + \sum_j F_{kj}^x; \\ m_k \frac{\partial^2 y_k}{\partial t^2} = \sum_{i=1}^3 F_{\text{Л}i}^y + \sum_{i=1}^3 F_{\text{П}i}^y + \sum_j F_{kj}^y; \\ m_k \frac{\partial^2 z_k}{\partial t^2} = -m_k g + \sum_{i=1}^3 F_{\text{Л}i}^z + \sum_{i=1}^3 F_{\text{П}i}^z + \sum_j F_{kj}^z; \\ J_{xk} \frac{\partial^2 \phi_{xk}}{\partial t^2} = \sum_{i=1}^3 M^x(F_{\text{Л}i}) + \sum_{i=1}^3 M^x(F_{\text{П}i}) + \sum_j M^x(F_{kj}); \\ J_{yk} \frac{\partial^2 \phi_{yk}}{\partial t^2} = \sum_{i=1}^3 M^y(F_{\text{Л}i}) + \sum_{i=1}^3 M^y(F_{\text{П}i}) + \sum_j M^y(F_{kj}); \\ J_{zk} \frac{\partial^2 \phi_{zk}}{\partial t^2} = \sum_{i=1}^3 M^z(F_{\text{Л}i}) + \sum_{i=1}^3 M^z(F_{\text{П}i}) + \sum_j M^z(F_{kj}), \end{array} \right.$$

где k – индекс тела (может принимать значения «Т», «Р», «Б»); t – время; $F_{\text{Л}i}$ и $F_{\text{П}i}$ – силы, передаваемые от колес через подвеску по левому (индекс «Л») и правому (индекс «П») бортам; F_{kj} – силы взаимодействия тела k с соседними телами j ; M^x, M^y, M^z – моменты перечисленных выше сил относительно оси i .

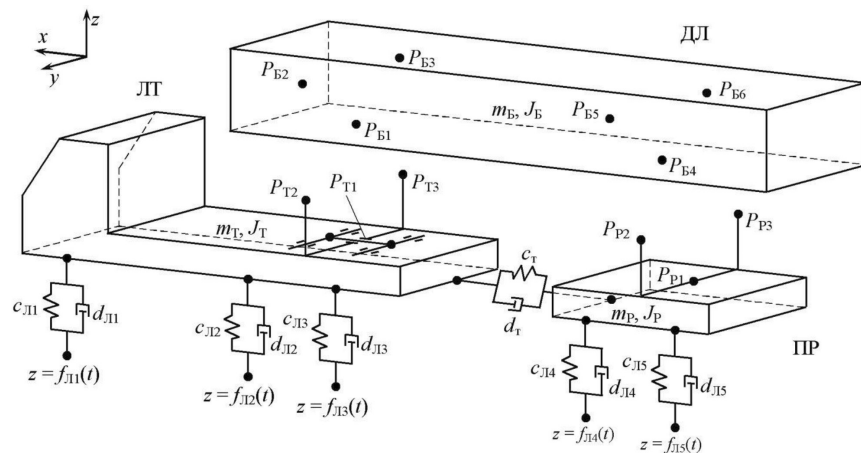


Рис. 2. Расчетная схема ЛТ с ПР, оснащенного РСКУ

Fig. 2. Design scheme of HT with TD equipped with RSBD

Для решения системы дифференциальных уравнений использовали следующие начальные условия: $x_k(t=0) = x_{k0}$; $y_k(t=0) = 0$; $z_k(t=0) = z_{k0}$; $v_{xk}(t=0) = v$; $v_{yk}(t=0) = 0$; $v_{zk}(t=0) = 0$, где x_{k0}, z_{k0} – координаты начального расположения тел ЛА, учитывающие его начальную геометрическую связность; индекс k принимает значения «Т», «Р», «Б»; координаты y_k равны нулю, так как в начальный момент времени все тела ЛА размещены строго над осью OX ; v_{xk}, v_{yk}, v_{zk} – начальные скорости тел; v – заданная скорость движения ЛА, поддерживаемая в дальнейшем постоянной для тягача $v_{x\text{Т}}(t) = v$, но не фиксируемая для других тел.

Взаимодействие тел в математической модели осуществлялось шарнирно и контактом точки с опорной поверхностью ЛД. В первом случае это взаимодействие ЛТ с ПР. Во втором случае это ЛТ, РПКУ и пакет ДЛ, а также ПР, РПКУ и пакет ДЛ. На начальном этапе исследования была применена упрощенная математическая модель колеса. Ее отличительными особенностями являются отсутствие деформации колеса, а также работа подвески за счет изменения расстояния от корпуса ЛТ с ПР до опорной поверхности ЛД:

$$F_i^z = c_i (z_{\text{П}i}(x_i, y_i) + R_{\text{к}} - z_{\text{К}i}) - d_i \left(\frac{\partial z_{\text{П}i}(x_i, y_i)}{\partial t} - \frac{\partial z_{\text{К}i}}{\partial t} \right),$$

где i – индекс колеса; c_i, d_i – коэффициенты жесткости и демпфирования вязкоупругого взаимодействия; $z_{\text{П}i}(x, y)$ – вертикальная координата поверхности под колесом, равная координате нижней точки колеса; $R_{\text{к}}$ – радиус колеса; $z_{\text{К}i}$ – вертикальная координата точки крепления колеса к корпусу.

В основе принципа работы РПКУ (точка $P_{\text{T}1}$ на рис. 2) лежит его смещение в продольном и поперечном направлениях относительно оси ЛТ (рис. 3).

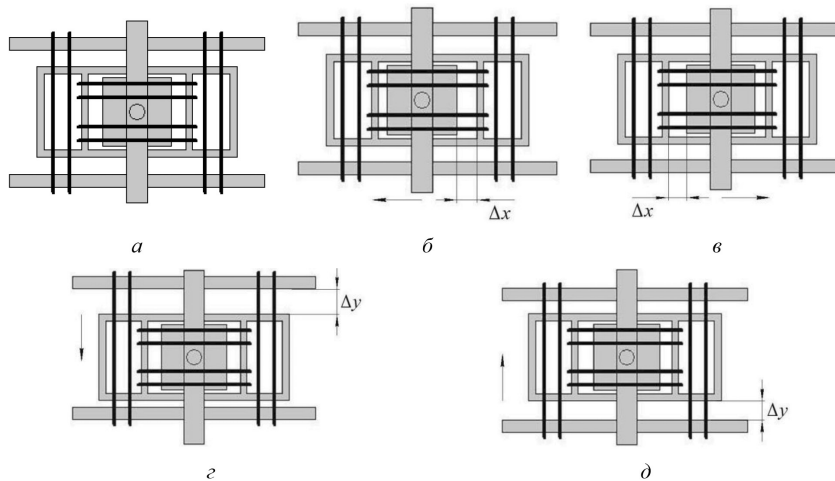


Рис. 3. Варианты размещения РПКУ относительно рамы ЛТ в различных режимах движения ЛА: *a* – расположение РПКУ в центре при неподвижном состоянии ЛА; *б, в* – смещение РПКУ вперед и назад относительно продольной оси ЛТ соответственно при торможении и трогании; *г, д* – смещение РПКУ вперед и назад относительно поперечной оси ЛТ соответственно при поворотах налево и направо

Fig. 3. Layout options of RSBД relative to the HT frame in different modes of the logging truck (LT): *a* – location of RSBД in the center when LT is stationary; *б, в* – forward and backward displacement of RSBД relative to the HT longitudinal axis when slowing down and moving off, respectively; *г, д* – forward and backward displacement of RSBД relative to the HT transverse axis when turning left and right, respectively

При движении ЛТ с ПР в процессе вывозки ДЛ по ровной поверхности ЛД с постоянной скоростью РПКУ располагается в центре относительно продольной и поперечной осей ЛТ (рис. 3, *a*). В случае торможения ЛТ с ПР или при преодолении вогнутого участка поверхности ЛД пакет ДЛ смещается в направлении

ЛТ, а РПКУ сдвигается вперед относительно продольной оси ЛТ (рис. 3, б). При движении ЛТ с ПР с положительным продольным ускорением или при преодолении выпуклого участка поверхности ЛД пакет ДЛ смещается назад относительно ЛТ, РПКУ сдвигается назад относительно продольной оси ЛТ (рис. 3, в). В процессе поворота ЛТ с ПР направо или при крене ЛА налево из-за разности высот опорной поверхности ЛД под колесами левого и правого бортов пакет ДЛ смещается влево, и вместе с ним сдвигается влево РПКУ (рис. 3, з). При повороте ЛТ с ПР налево или крене ЛА направо пакет ДЛ и РПКУ смещаются вправо (рис. 3, д).

Гидравлическая подсистема РПКУ состоит из совокупности поперечных и продольных гидроцилиндров, которые при перемещении РПКУ перекачивают рабочую жидкость из гидравлической магистрали низкого давления в гидравлическую магистраль высокого давления, соединенную с пневмогидравлическим аккумулятором. С одной стороны, продольные и поперечные гидроцилиндры при работе оказывают сопротивление движению РПКУ. С другой стороны, механические движения поршней поперечных и продольных гидроцилиндров, жестко связанных с РПКУ, приводят к вытеснению рабочей жидкости в напорную гидравлическую магистраль и накоплению энергии этой жидкости в пневмогидравлических аккумуляторах. Упрощенная модель позволяет оценить характерное значение текущей мощности N_{PT} , которую выделяет система рекуперации РПКУ:

$$N_{PT} = \left| \frac{x_{П}^{\tau} - x_{П}^{\tau-1}}{\Delta t} \right| P_p \frac{\pi D_{ГЦ}^2}{4},$$

где $x_{П}^{\tau}$ и $x_{П}^{\tau-1}$ – положения РПКУ в системе координат, связанной с ЛТ, в текущий τ и предыдущий $\tau - 1$ моменты времени; Δt – шаг интегрирования по времени уравнений механического движения тел; P_p – характерное давление в рекуперативной системе (в частности предельное давление пневмогидравлического аккумулятора).

Эта формула применяется для расчета как продольного, так и поперечного движения РПКУ, соответственно получаются продольная N_{PTX} и поперечная N_{PTY} рекуперлируемые мощности. Общая рекуперлируемая мощность находится суммированием:

$$N_{PT} = N_{PTX} + N_{PTY}.$$

Из-за силы сопротивления движению РПКУ, оказываемой со стороны поперечных и продольных гидроцилиндров, ПР и пакет ДЛ могут испытывать дополнительные неблагоприятные ускорения. Для контроля плавности движения ПР и перевозимого пакета ДЛ далее используется такая характеристика, как среднее продольное ускорение $a_{Бс}$ пакета ДЛ:

$$a_{Бс} = \frac{\Delta t}{t_2 - t_1} \sum_{\tau=\left[\frac{t_1}{\Delta t}\right]}^{\left[\frac{t_2}{\Delta t}\right]} \left| \frac{x_p^{\tau} + x_p^{\tau} - 2x_p^{\tau-2}}{(\Delta t)^2} \right|,$$

где x_p – координата ПР в глобальной системе координат.

Аналогичным образом определяется поперечное ускорение ПР $a_{Бсy}$. После чего на основе $a_{Бсx}$ и $a_{Бсy}$ рассчитывается суммарное ускорение $a_{Бс}$ по теореме Пифагора. Необходимо отметить, что в проводимых далее компьютерных экспериментах рассматривается движение ЛТ с ПР с постоянной продольной скоростью v_T .

Чем сложнее рельеф поверхности ЛД, тем больший ход обеспечивается в РПКУ. Это позволяет с помощью ранее разработанной математической модели выполнить проверку работы РПКУ при движении ЛТ с ПР по недостаточно обустроенной ЛД. В данной модели принимался рельеф опорной поверхности ЛД, который включал в себя такие дефекты ЛД, как холмы и препятствия. Протяженность первых составляла 2–5 м, а вторых – 0,2–0,5 м. В разрабатываемой математической модели задавалась функция высоты опорной поверхности ЛД от координат точки контакта колеса $z(x, y)$.

Распределение гауссовых пиков и их параметров ($H_i = 0–0,1$ м и $\sigma_i = 0,05–0,15$ м) на контрольном участке ЛД (500×5 м²) выполнялось по равномерному закону случайным образом. Вследствие того, что функция $z(x, y)$ является функцией двух переменных, преобразуя эту функцию, получали две функции одной переменной: первую – для колес левого борта ЛТ с ПР $z(x, -B/2)$, вторую – для колес правого борта $z(x, B/2)$. Две функции одной переменной зависят от колеи B ЛТ с ПР. Решение дифференциальных уравнений осуществлялось при помощи численного метода Рунге–Кутты.

Для последующего исследования РПКУ ЛТ с ПР авторами была разработана компьютерная программа (рис. 4). Она позволяет имитировать работу РПКУ при движении ЛТ с ПР загруженного ДЛ по недостаточно обустроенной ЛД.

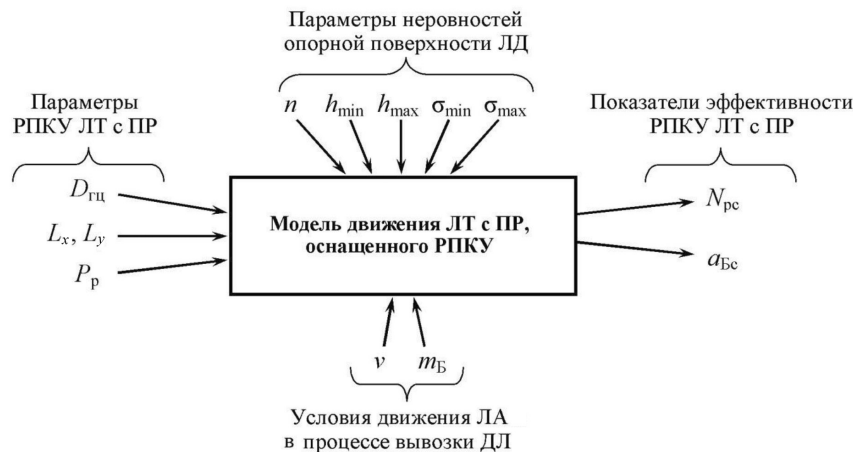


Рис. 4. Входные параметры (факторы) и показатели эффективности (критерии) разработанной компьютерной программы: n – количество неровностей на 1 км пути ЛД; h_{\min} , h_{\max} , σ_{\min} , σ_{\max} – высоты и длины неровностей ЛД; v – скорость движения ЛТ с ПР; $m_{\text{Б}}$ – масса вывозимых ДЛ; $D_{\text{ГЦ}}$ – диаметр поперечных и продольных гидроцилиндров; $L_x = L_y$ – максимальные перемещения РПКУ относительно продольной и поперечной осей ЛТ; P_p – рабочее давление в гидроприводе РПКУ; $N_{\text{рс}}$ – рекуперлируемая мощность при продольных и поперечных перемещениях; $a_{\text{Бс}}$ – ускорение пакета ДЛ в горизонтальном направлении

Fig. 4. Input parameters (factors) and performance indicators (criteria) of the developed computer program: n – number of irregularities per 1 km of the logging road (LR); h_{\min} , h_{\max} , σ_{\min} , σ_{\max} – heights and lengths of LR irregularities; v – driving speed of HT with TD; $m_{\text{Б}}$ – mass of the exported LCT; $D_{\text{ГЦ}}$ – diameter of transverse and longitudinal hydraulic cylinders; $L_x = L_y$ – peak displacement of RSBД relative to the HT longitudinal and transverse axes; P_p – working pressure in the RSBД hydraulic drive; $N_{\text{рс}}$ – recoverable power at longitudinal and transverse displacements; $a_{\text{Бс}}$ – acceleration of an LCT bundle horizontally

Основной целью такого исследования является оценка эффективности предлагаемого РПКУ, а также определение его оптимальных конструктивных параметров. Разработанная компьютерная программа учитывает большое количество геометрических, механических и гидравлических параметров как ЛТ с ПР, так и РПКУ. Кроме того, она предоставляет широкие возможности для исследования процесса движения ЛТ с ПР по недостаточно обустроенной ЛД. Для выполняемого исследования выбраны три наиболее важных параметра: первый – диаметр рекуперативных продольных и поперечных гидроцилиндров $D_{гц}$ РПКУ, второй – скорость движения ЛТ с ПР v , третий – среднее значение высоты неровностей опорной поверхности ЛД $h_{ср}$. В дальнейшем теоретическом исследовании необходимо установить влияние перечисленных конструктивных и технологических параметров на показатели эффективности РПКУ $N_{рс}$ и $a_{Бс}$.

Результаты исследования и их обсуждение

В процессе теоретического исследования движения ЛТ с ПР, оснащенного РПКУ, по недостаточно обустроенной ЛД проведено более 50 компьютерных экспериментов. В рамках каждого из них модель ЛТ с ПР преодолевала расстояние 500 м по случайному неровному рельефу ЛД. Длительность одного эксперимента составляла около 1 мин машинного времени на типичном персональном компьютере.

В начальный момент времени три основных тела модели (корпус ЛТ, корпус ПР, пакет ДЛ) располагались на определенном удалении друг от друга и заведомо выше опорной поверхности ЛД. В первые 5 с модельного времени отдельные тела соединялись в ЛА, он опускался на опорную поверхность ЛД и приходил в состояние устойчивого равновесия. После этого начинался компьютерный эксперимент (время t_1). При преодолении ЛТ с ПР дистанции 500 м эксперимент прекращался (время t_2). В процессе движения ЛТ с ПР по неровной опорной поверхности ЛД РПКУ совершало колебательные движения в продольном направлении по отношению к корпусу ЛТ с амплитудой около 0,1 м (рис. 5, а) и в поперечном направлении с амплитудой около 0,2 м (рис. 5, б). Выделение мощности системой рекуперации наиболее выражено в моменты существенных перемещений РПКУ из-за насосного эффекта, что приводит к появлению пиков на графике зависимости мгновенной мощности от времени (рис. 5, в). Пиковые значения рекуперированной мощности составляют более 20 кВт. Горизонтальное ускорение пакета ДЛ, обеспечиваемое системой рекуперации, невелико и лежит в пределах 0,3...0,6 м/с² (рис. 5, г).

В большинстве компьютерных экспериментов скорость движения ЛТ с ПР составляла 30 км/ч, средняя высота неровностей опорной поверхности ЛД – 0,5 м, внутренний диаметр поперечных и продольных гидроцилиндров – 60 мм. Теоретическое исследование проводили по «звездообразной» схеме. Основные параметры изменяли по одному, сохраняя остальные параметры на уровне базовых значений.

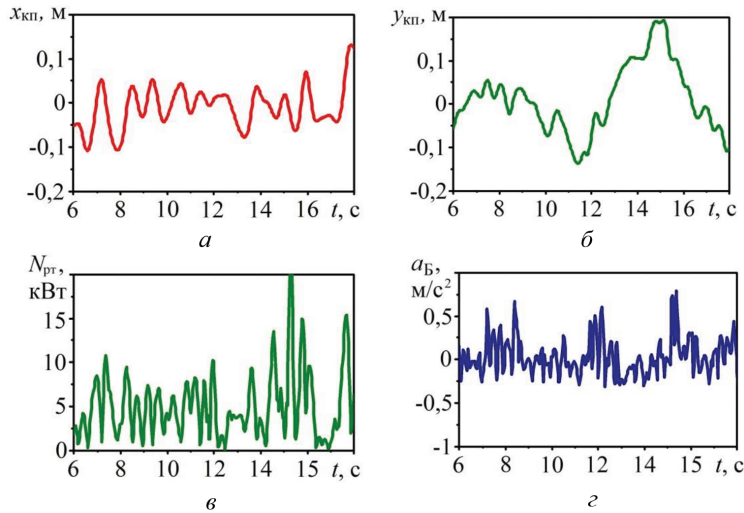


Рис. 5. Зависимости изменения продольного положения $x_{\text{кп}}$ (а) и поперечного положения $y_{\text{кп}}$ (б) РПКУ, текущего значения рекуперлируемой мощности $N_{\text{рТ}}$ (в) и текущего значения ускорения $a_{\text{б}}$ (г) пакета ДЛ от времени t

Fig. 5. Dependences of change in the longitudinal position $x_{\text{кп}}$ of RSB (а), the transverse position $y_{\text{кп}}$ of RSB (б), the current value of the recoverable power $N_{\text{рТ}}$ (в) and the current value of acceleration $a_{\text{б}}$ (г) of the LCT bundle on time t

Чем больше средняя высота неровностей опорной поверхности ЛД, тем больше интенсивность колебаний корпуса ЛТ, ПР и пакета ДЛ (рис. 6), следовательно, большего значения рекуперлируемой мощности, создаваемого РПКУ, можно ожидать. Однако с увеличением средней высоты неровностей опорной поверхности ЛД более выражено неблагоприятное воздействие ускорения пакета ДЛ на ЛТ.

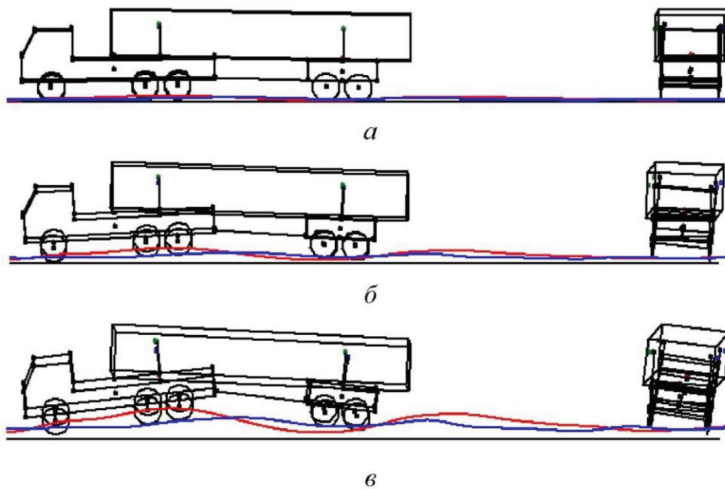


Рис. 6. Рельеф опорной поверхности ЛД при различных средних высотах неровностей: а – 0,2 м; б – 0,5 м; в – 1 м

Fig. 6. Relief of the LR bearing area at different average heights of irregularities: а – 0.2 m; б – 0.5 m; в – 1 m

С целью изучения влияния средней высоты неровностей ЛД на исследуемые показатели эффективности РПКУ выполнены компьютерные эксперименты. В ходе этих экспериментов среднюю высоту неровностей ЛД увеличивали с шагом 0,2 м в интервале 0–1 м. Выявлено, что такое увеличение способствует возрастанию рекуперированной мощности, создаваемой РПКУ (рис. 7, а), а также усугублению неблагоприятного воздействия горизонтального ускорения пакета ДЛ на ЛТ (рис. 7, б). В этой связи оснащение ЛА предлагаемым РПКУ имеет обоснованную целесообразность при вывозке им ДЛ, особенно в условиях недостаточно обустроенных ЛД. Если при средней высоте неровностей 0,2 м система рекуперации позволяет выделить около 2,5 кВт мощности, то при средней высоте неровностей около 0,6 м – уже примерно 9 кВт. При этом во всем исследованном диапазоне высот неровностей система рекуперации обеспечивает приемлемое горизонтальное ускорение пакета ДЛ (не более 3 м/с²).

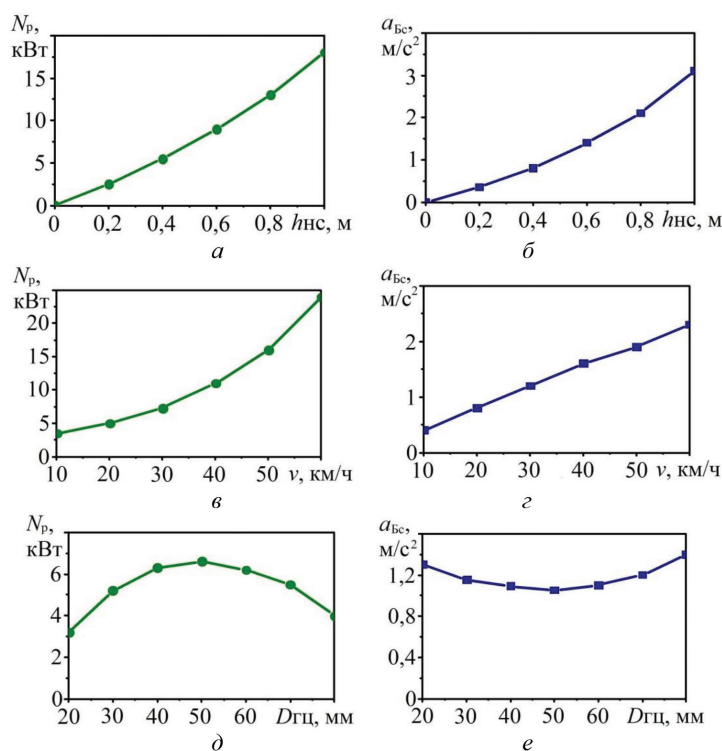


Рис. 7. Зависимости изменения средних значений рекуперированной мощности N_p и горизонтального ускорения пакета ДЛ от средней высоты $h_{НС}$ неровностей опорной поверхности ЛД (а, б), от скорости движения v ЛА (в, г) и от внутреннего диаметра $D_{ГЦ}$ продольных и поперечных гидроцилиндров РПКУ (д, е)

Fig. 7. Dependences of change in the average values of the recoverable power N_p and the horizontal acceleration of the LCT bundle on the average height $h_{НС}$ of the irregularities of the LR bearing area (а, б), on the driving speed v of LT (в, г) and on the inner diameter $D_{ГЦ}$ of longitudinal and transverse hydraulic cylinders of RSBD (д, е)

Скорость движения ЛТ с ПР по недостаточно обустроенной ЛД должна определять интенсивность колебательного движения пакета ДЛ относительно ЛТ. Поэтому скорость должна оказывать существенное влияние как на процесс рекуперирования мощности, так и на гашение взаимных колебаний тел системы в РПКУ. Для исследования влияния скорости на показатели эффективности системы рекуперации провели серию из 6 компьютерных экспериментов, в которых скорость движения ЛТ с ПР изменяли от 10 до 60 км/ч с шагом 10 км/ч. Установлено, что с увеличением скорости движения ЛТ с ПР средняя рекуперлируемая мощность растет в соответствии с квадратичным законом (рис. 7, в), а неблагоприятное горизонтальное ускорение пакета ДЛ – с линейным (рис. 7, в). Разработанное РПКУ может быть использовано в широком диапазоне скоростей движения ЛТ с ПР. Предлагаемая система рекуперации обеспечивает в широком диапазоне скоростей (от 10 до 60 км/ч) достаточно высокий рекуперативный эффект (от 3 до 24 кВт) и достаточно низкое горизонтальное ускорение пакета ДЛ (от 0,4 до 2,3 м/с²).

Параметры гидравлической подсистемы РПКУ должны определять рекуперлируемую мощность и плавность транспортирования ДЛ. Наиболее важным конструктивным параметром РПКУ является внутренний диаметр продольных и поперечных гидроцилиндров. Для исследования влияния этого конструктивного параметра на показатели эффективности РПКУ выполнена серия компьютерных экспериментов, в ходе которых внутренний диаметр продольных и поперечных гидроцилиндров увеличивали от 20 до 80 мм с шагом 10 мм.

Выявлено, что очень малый внутренний диаметр продольных и поперечных гидроцилиндров (20...40 мм) препятствует созданию существенного насосного эффекта, так как мал объем полостей гидроцилиндров, поэтому рекуперлируемая мощность достаточно низкая и составляет 3–6 кВт (рис. 7, д). При таких значениях внутреннего диаметра продольных и поперечных гидроцилиндров наблюдается увеличенное горизонтальное ускорение пакета ДЛ, составляющее от 0,9 до 1,3 м/с². Это объясняется почти полным отсутствием в таких условиях сопротивления перемещению РПКУ (рис. 7, е). При очень большом диаметре продольных и поперечных гидроцилиндров (60...80 мм) для перемещения поршней необходимы высокие усилия, что снижает насосный эффект, поэтому рекуперлируемая мощность в данном диапазоне также мала (4,0...6,0 кВт). Из-за жесткой механической связи между ЛТ и пакетом ДЛ горизонтальное ускорение пакета ДЛ также велико (0,9...1,4 м/с²). Оптимальный внутренний диаметр продольных и поперечных гидроцилиндров составляет 50 мм. При этом наиболее выражен насосный эффект системы рекуперации, обеспечивающий максимум рекуперлируемой мощности – 6,7 кВт, и достигается достаточно хорошая плавность движения пакета ДЛ – горизонтальное ускорение не превышает 1,04 м/с².

Заключение

Результаты теоретического исследования по предварительной оценке эффективности оснащения лесовозного тягача с прицепом-ропуском предлагаемой конструкцией рекуперативного поворотного коникового устройства позволяют сделать вывод, что применение такой конструкции имеет обосно-

ванную целесообразность при вывозке лесовозным автопоездом длинномерных лесоматериалов, особенно в условиях недостаточно обустроенных лесовозных дорог. Установлено, что при движении лесовозного тягача с прицепом-ропуском в сложных дорожных условиях со скоростью в интервале от 10 до 60 км/ч рекуперлируемая мощность изменяется в диапазоне от 3 до 24 кВт, а среднее горизонтальное ускорение пакета длинномерных лесоматериалов увеличивается от 0,4 до 2,3 м/с². Выявлено, что оптимальные диаметры поперечных и продольных гидроцилиндров рекуперативного поворотного коникового устройства, обеспечивающие максимальную рекуперлируемую мощность 6,7 кВт и среднее горизонтальное ускорение пакета длинномерных лесоматериалов 1 м/с², составляют 50 мм.

Оснащение лесовозного тягача с прицепом-ропуском предлагаемой конструкцией коникового устройства повысит эффективность лесовозного тягача при его движении по недостаточно обустроенным лесовозным дорогам не только за счет сокращения расхода топлива в процессе накопления и повторного использования энергии рабочей жидкости, но и за счет демпфирующих свойств, способствующих повышению надежности лесовозного тягача, плавности его хода, и, как следствие, создаст более благоприятные условия работы для водителей лесовозных автопоездов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.
Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskiy Yu.V. *Planning an Experiment in the Search for Optimal Conditions*. Moscow, Nauka Publ., 1976. 279 p.
2. Грановский В.А., Сирая Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. 288 с.
Granovskiy V.A., Siraya T.N. *Methods for Processing Experimental Data in Measurements*. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1990. 288 p.
3. Мудров А.Е. Численные методы для ПЭВМ на языках Бейсик, Фортран и Паскаль. Томск: МП «РАСКО», 1991. 272 с.
Mudrov A.E. *Numerical Methods for PC in Basic, Fortran and Pascal*. Tomsk, MR "RASKO" Publ., 1991. 272 p.
4. Никонов В.О. Современное состояние, проблемы и пути повышения эффективности лесовозного автомобильного транспорта. Воронеж: ВГЛУ, 2021. 203 с.
Nikonov V. O. *Current State, Problems and Ways to Improve the Efficiency of Timber Road Transport*: Monograph. Voronezh, VGLTU Publ., 2021. 203 p.
5. Посметьев В.И., Никонов В.О., Посметьев В.В., Матяшов А.Е. Совершенствование системы рекуперации энергии лесовозного тягача с прицепом-ропуском // Лесотехн. журн. 2021. Т. 11, № 2(42). С. 149–165.
Posmetyev V.I., Nikonov V.O., Posmetyev V.V., Matyashov A.E. Improvement of the Energy Recovery System of a Timber Tractor with a Lumber Truck. *Forestry Engineering Journal*, 2021, vol. 11, no. 2(42), pp. 149–165. <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.2/14>
6. Посметьев В.И., Никонов В.О., Посметьев В.В., Сизьмин И.В. Имитационная модель оценки эффективности лесовозного автопоезда, оснащенного рекуперативным пневмогидравлическим тягово-сцепным устройством // Лесотехн. журн. 2020. Т. 10, № 4(40). С. 181–196.
Posmetyev V.I., Nikonov V.O., Posmetyev V.V., Sizmin I.V. Simulation Model for Estimation of Forest Truck Performance Equipped with Recuperative Spring-Hydraulic

Fifth-Wheel Coupling. *Forestry Engineering Journal*, 2020, vol. 10, no. 4(40), pp. 181–196. <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.4/15>

7. Abdelkareem M.A.A., Xu L., Ahmed Ali M.K., El-Daly A.-R.B.M., Hassan M.A., Elagouz A., Bo Y. Analysis of the Prospective Vibrational Energy Harvesting of Heavy-Duty Truck Suspension: A Simulation Approach. *Energy*, 2019, vol. 173, pp. 332–351. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.060>

8. Li J., Zhao J. Energy Recovery for Hybrid Hydraulic Excavators: Flywheel-Based Solutions. *Automation in Construction*, 2021, vol. 125, art. 103648. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103648>

9. Luo D., Wang R., Yu W., Sun Z., Meng X. Theoretical Analysis of Energy Recovery Potential for Different Types of Conventional Vehicles with a Thermoelectric Generator. *Energy Procedia*, 2019, vol. 158, pp. 142–147. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.061>

10. Morangueira Y.I.A., de C. Pereira J.C. Energy Harvesting Assessment with a Coupled Full Car and Piezoelectric Model. *Energy*, 2020, vol. 210, art. 118668. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118668>

11. Pipitone E., Vitale G. A Regenerative Braking System for Internal Combustion Engine Vehicles Using Supercapacitors as Energy Storage Elements – Part 1: System Analysis and Modelling. *Journal of Power Sources*, 2020, vol. 448, art. 227368. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227368>

12. Pugi L., Pagliali M., Nocentini A., Lutzemberger G., Pretto A. Design of a Hydraulic Servo-Actuation Fed by a Regenerative Braking System. *Applied Energy*, 2017, vol. 187, pp. 96–115. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.047>

13. Rakov V., Kapustin A., Danilov I. Study of Braking Energy Recovery Impact on Cost-Efficiency and Environment Safety of Vehicle. *Transportation Research Procedia*, 2020, vol. 50, pp. 559–565. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.10.067>

14. Ranjan P., Wrat G., Bholra M., Mishra S.Kr., Das J. A Novel Approach for the Energy Recovery and Position Control of a Hybrid Hydraulic Excavator. *ISA Transactions*, 2020, vol. 99, pp. 387–402. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.08.066>

15. Read M.G., Smith R.A., Pullen K.R. Optimization of Flywheel Energy Storage Systems with Geared Transmission for Hybrid Vehicles. *Mechanism and Machine Theory*, 2015, vol. 87, pp. 191–209. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2014.11.001>

16. Silva Bravo R.R., De Negri V.J., Martins Oliveira A.A. Design and Analysis of a Parallel Hydraulic-Pneumatic Regenerative Braking System for Heavy-Duty Hybrid Vehicles. *Applied Energy*, 2017, vol. 225, pp. 60–77. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.102>

17. Yu W., Wang R. Development and Performance Evaluation of a Comprehensive Automotive Energy Recovery System with a Refined Energy Management Strategy. *Energy*, 2019, vol. 189, art. 116365. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116365>

18. Yu W., Wang R., Zhou R. A Comparative Research on the Energy Recovery Potential of Different Vehicle Energy Regeneration Technologies. *Energy Procedia*, 2019, vol. 158, pp. 2543–2548. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.001>

19. Zhang Y., Zhang X., Zhan M., Guo K., Zhao F., Liu Z. Study on a Novel Hydraulic Pumping Regenerative Suspension for Vehicles. *Journal of the Franklin Institute*, 2015, vol. 352, iss. 2, pp. 485–499. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2014.06.005>

20. Zou J., Guo X., Abdelkareem M.A.A., Xu L., Zhang J. Modelling and Ride Analysis of a Hydraulic Interconnected Suspension Based on the Hydraulic Energy Regenerative Shock Absorbers. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, vol. 127, pp. 345–369. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2019.02.047>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья

УДК 630*2(075)

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-5-100-113

Моделирование критических локальных деформаций коры растущего дерева при ветровой нагрузке

Г.Н. Колесников¹, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [A-1553-2014](https://orcid.org/0000-0001-9694-0264),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9694-0264>

О.И. Григорьева², канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [AAC-9570-2020](https://orcid.org/0000-0001-5937-0813),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>

И.В. Григорьев³, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [S-7085-2016](https://orcid.org/0000-0002-5574-1725),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

В.А. Макуев⁴, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAD-2903-2020](https://orcid.org/0000-0002-5905-8923),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5905-8923>

Т.Н. Стородубцева⁵, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [ACF-4424-2022](https://orcid.org/0000-0002-4925-8542),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4925-8542>

В.В. Швецова⁶, канд. техн. наук; ResearcherID: [AAC-3395-2021](https://orcid.org/0000-0001-8566-2326),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8566-2326>

¹Петрозаводский государственный университет, просп. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910; kgn@petsu.ru

²Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; grigoreva_o@list.ru

³Арктический государственный агротехнологический университет, 3-й км, д. 3, ш. Сергеляхское, г. Якутск, Россия, 677007; silver73@inbox.ru

⁴Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), ул. 1-я Институтская, д. 1, г. Мытищи, Московская обл., Россия, 141005; makev@mgul.ac.ru

⁵Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия, 394087; tamara-tns@yandex.ru

⁶Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 190005; vikt.schvetzova2012@yandex.ru

Поступила в редакцию 05.10.21 / Одобрена после рецензирования 15.01.22 / Принята к печати 19.01.22

Аннотация. Взаимное влияние ветровой нагрузки и лесных насаждений достаточно хорошо изучено. К настоящему времени в данной области накоплен и отражен в публикациях большой объем ценной научной и практической информации. Известны данные о повреждении ветровой нагрузкой насаждений, ее воздействии на их прирост, а также о способности лесных насаждений снижать скорость и силу ветра. Тем не менее проблемы воздействия ветра как на отдельные деревья, так и на лесные массивы не теряют актуальности. Анализ литературы и интернет-ресурсов показал, за рамками исследований остался вопрос о влиянии ветровой нагрузки на качество выращиваемой древесины. Для каждой местности многолетние наблюдения и построенная на их основе роза ветров позволяют определить преобладающие силу и направление ветра. Зная особенности влияния ветровой нагрузки на качество лесоматериалов, получаемых после рубки насаждения, можно прогнозировать процент выхода деловой и низкокачественной древесины, а при плантационном выращивании леса целевым образом влиять на этот показатель, высаживая посадочный материал с учетом этих

© Колесников Г.Н., Григорьева О.И., Григорьев И.В., Макуев В.А., Стородубцева Т.Н., Швецова В.В., 2022

Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

данных. Разработана методика для теоретической оценки вероятности появления критических деформаций коры в сжатой зоне, которая образуется при изгибе растущего дерева под действием ветровой нагрузки. В качестве теоретической основы методики использованы классические исследования критического состояния сжатых стержней на упругом основании. Роль стержня выполняет участок коры растущего дерева, а роль упругого основания – камбий и другие живые клетки, находящиеся между корой и древесиной ствола. Для получения количественных оценок предложено соотношение, достаточно простое для практического применения. Адекватность результатов моделирования подтверждена их согласованностью с опытными данными. Применение разработанной методики показано на примерах.

Ключевые слова: ветровая нагрузка на дерево, ветровая нагрузка на насаждение, влияние ветровой нагрузки на качество древесины, деформации коры, целевое выращивание леса, моделирование деформаций

Благодарности: Авторы выражают глубокую признательность коллегам по научной школе «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» за ценные сведения и замечания, высказанные при подготовке данной работы.

Для цитирования: Колесников Г.Н., Григорьева О.И., Григорьев И.В., Макуев В.А., Стородубцева Т.Н., Швецова В.В. Моделирование критических локальных деформаций коры растущего дерева при ветровой нагрузке // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 5. С. 100–113. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-100-113>

Original article

Modeling of Critical Local Deformations of Growing Tree Bark under Wind Loads

Gennady N. Kolesnikov¹, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [A-1553-2014](https://orcid.org/0000-0001-9694-0264),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9694-0264>

Olga I. Grigoreva², Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAC-9570-2020](https://orcid.org/0000-0001-5937-0813),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>

Igor V. Grigorev³, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [S-7085-2016](https://orcid.org/0000-0002-5574-1725),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

Valentin A. Makuev⁴, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAD-2903-2020](https://orcid.org/0000-0002-5905-8923),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5905-8923>

Tamara N. Storodubtseva⁵, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [ACF-4424-2022](https://orcid.org/0000-0002-4925-8542),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4925-8542>

Victoria V. Shvetsova⁶, Candidate of Engineering; ResearcherID: [AAC-3395-2021](https://orcid.org/0000-0001-8566-2326),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8566-2326>

¹Petrozavodsk State University, prosp. Lenina, 33, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910, Russian Federation; kgn@petrsu.ru

²Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; grigoreva_o@list.ru

³Arctic State Agrotechnological University, 3-y km, 3, sh. Sergelyakhskoye, Yakutsk, 677007, Russian Federation; silver73@inbox.ru

⁴Mytischki Branch of Bauman Moscow State Technical University, ul. 1-ya Institutskaya, 1, Mytischki, Moscow Region, 141005, Russian Federation; makuev@mgul.ac.ru

⁵Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, ul. Timiryazeva, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; tamara-tns@yandex.ru



⁶Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, ul. 2-ya Krasnoarmeyskaya, 4, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; vikt.schvetzova2012@yandex.ru

Received on October 5, 2021 / Approved after reviewing on January 15, 2022 / Accepted on January 19, 2022

Abstract. The interaction between wind loads and forest plantations has been fairly well understood. A large amount of valuable scientific and practical information has been obtained and published so far in this field. There are some known data on wind load damage to plantations, its effect on their growth, and the ability of forest plantations to reduce wind speed and force. Nevertheless, the issues of wind impact on both individual trees and forested areas remain relevant. Analysis of the literature and Internet resources showed that the research has left out the issue of the wind load impact on the grown wood quality. Multi-year observations and a wind rose created using these observations enable the determination of the prevailing wind strength and direction for each area. Knowing the features of the wind load impact on the quality of timber after logging, it is possible to predict the percentage of the yield of commercial and low-quality wood, and to purposefully influence this parameter in plantation forest growing by setting out the planting material in accordance with these data. The article shows the developed method for theoretical estimation of the probability of occurrence of critical bark deformations in the compressed zone, which appears when bending a growing tree due to wind load. Classical studies of the critical state of compressed rods on an elastic base were used as the theoretical basis of the method. A part of growing tree bark plays the role of a rod, while cambium and other living cells between the bark and the trunk wood play the role of the elastic base. A correlation simple enough for practical application is proposed in order to obtain quantitative estimates. Adequacy of the modeling results is confirmed by their consistency with the experimental data. The application of the developed methodology is shown on the examples.

Keywords: wind load on a tree, wind load on a plantation, wind load impact on wood quality, bark deformations, target forest cultivation, modeling of deformations

Acknowledgements: The authors gratefully acknowledge the valuable insights and comments made by colleagues at the Scientific School “Innovations in Logging Industry and Forestry” in the preparation of this paper.

For citation: Kolesnikov G.N., Grigoreva O.I., Grigorev I.V., Makuev V.A., Storodubtseva T.N., Shvetsova V.V. Modeling of Critical Local Deformations of Growing Tree Bark under Wind Loads. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 5, pp. 100–113. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-100-113>

Введение

Взаимодействие ветра и лесных насаждений, ветра и отдельных деревьев изучается в течение многих лет. К настоящему времени в данной области накоплен и отражен в публикациях большой объем ценной научной и практической информации. Тем не менее проблемы воздействия ветра как на отдельные деревья, так и на лесные массивы остаются актуальными, что подтверждается неослабевающим потоком публикаций на эту тему в специализированных журналах. Только некоторые из этих публикаций представлены в списке использованной литературы. Данная работа расширяет выводы недавно вышедших статей [3, 4, 15], использованы также результаты других цитируемых далее исследований.

В статье [22] рассматривается механическое воздействие ветра и снега на отдельные деревья и на деревья в насаждениях сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), ели обыкновенной (*Picea abies* (L.) Karst.) и березы (*Betula* spp.) применительно к условиям Финляндии. По итогам исследования предложена механико-математическая модель, предсказывающая скорость ветра, при которой деревья на опушках леса будут вырваны с корнем или сломаны. За рамками этого исследования остался вопрос: будет ли повреждена кора дерева, если ветер заставит ствол согнуться, но не выдернет его с корнем. Изгиб ствола дерева вызывает растяжение одних условных продольных волокон и сжатие диаметрально противоположных (рис. 1).

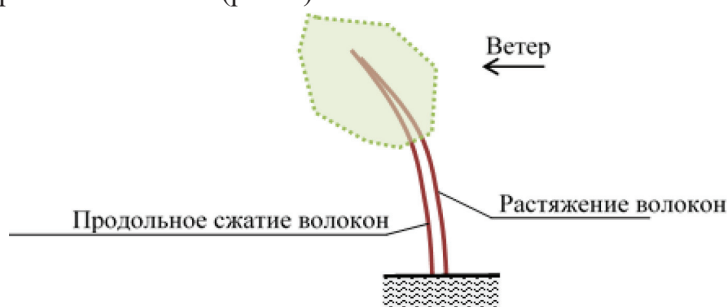


Рис. 1. Искривление ствола дерева под воздействием ветра и возникновение зон растяжения и сжатия

Fig. 1. The curvature of a tree trunk caused by wind and the occurrence of tension and compression zones

Ветровая нагрузка может быть причиной искривления стволов деревьев (рис. 2) и, как следствие, причиной повреждений (разрыва) камбиального слоя при его растяжении и отслоения камбия в сжатой зоне (рис. 3) [23]. Отслоение камбия визуально не обнаруживается, так как является внутренним повреждением древесины в сжатой зоне, появляющейся в результате воздействия ветра при изгибе ствола растущего дерева [15].



Рис. 2. Изгиб стволов сосны под ветровой нагрузкой

Fig. 2. Bending of pine trunks due to wind load

Такие повреждения в конечном итоге снижают качество древесины: ее прочность и возможности дальнейшего использования для производства важных деталей конструкционного назначения [6], – а значит и стоимость выращиваемой древесины [8, 9, 17, 21]. Получаемая в результате воздействия ветровой нагрузки неравномерность строения древесины, например свилеватость, может негативно сказываться на результатах модификации древесины [16, 18, 19].

Ветер воздействует на защитные полосы леса [2] и лесные массивы, пройденные выборочными рубками [5].

Поскольку отслоение камбия визуально не обнаруживается, а томография и другие экспериментальные методы исследования растущих деревьев остаются дорогостоящими, то для анализа условий отслоения применимы методы математического моделирования. Косвенным подтверждением отслоения может быть появление визуально определяемой волнообразной поверхности коры в сжатой зоне молодых деревьев при их изгибе, вызванном воздействием ветра. Одна из причин образования таких складок рассмотрена в статье [3]. Возникновение складок (волнообразной поверхности) в сжатой зоне можно наблюдать, например, в простом опыте при достаточно сильном изгибе ветви березы, когда первоначально гладкая поверхность коры трансформируется в сжатой зоне в волнистую поверхность (рис. 3). Рис. 3, б показывает, что на неизогнутой (левой) части образца складок нет, однако по мере роста деформаций изгиба складки становятся более выраженными, при этом возрастает их высота (т. е. высота волны волнообразной поверхности коры в сжатой зоне).



Рис. 3. Трансформация первоначально гладкой поверхности коры (а) в волнообразную поверхность (б) в зоне сжатия при изгибе [7]

Fig. 3. Transformation of the initially smooth bark surface (а) into undulated bark surface (б) in the bending compression zone [7]

В [20] экспериментально установлено, что у *Pinus sylvestris* статический изгиб вызывает снижение гидравлической проводимости на 19,5%; при динамическом изгибе, в зависимости от характеристик ветрового воздействия, этот показатель может достигать 88%. В том же исследовании [20] зафиксирована более высокая устойчивость к воздействию деформаций изгиба у *Picea abies*. Тем не менее деформации изгиба вследствие ветрового воздействия могут стать причиной появления некоторых пороков древесины, которые более подробно рассмотрены в [3, 4].

Экспериментальные исследования [20, 22, 23] важны в научном и практическом плане. Однако для лучшего понимания тенденций поведения ствола и ветвей дерева при изгибе, вызванном ветровой нагрузкой, необходимы соответствующие аналитические соотношения, механико-математические модели и методики, которые позволили бы прогнозировать последствия ветровой нагрузки на растущие деревья. К таким последствиям относятся не только ветровалы [12, 14, 24], но и пороки древесины, что более подробно рассмотрено в статьях [3, 4, 15]. Однако в литературе недостаточно полно исследованы вопросы моделирования возможных повреждений камбия и других клеток в сжатой зоне ствола и ветвей растущего дерева при ветровой нагрузке. Разработка и применение соответствующих моделей позволят уменьшить объем дорогостоящих экспериментальных исследований в данной области (но не исключить их), обеспечив при этом ученых новым инструментом прогнозирования последствий ветровой нагрузки, и помогут обосновывать рекомендации по совершенствованию технологий лесного хозяйства.

Цель исследования – разработка аналитической модели для прогнозирования критических деформаций коры и отслоения камбия в сжатой зоне, появляющихся при изгибе ствола растущего дерева под воздействием ветровой нагрузки.

Объекты и методы исследования

Исследования [15, 23] позволяют предположить, что трансформация коры, аналогичная показанной на рис. 3, имеет место в стволах деревьев. Однако для испытаний стволов растущих деревьев необходимы лебедки и другое специальное оборудование, иными словами, это технически сложные и не всегда экономически целесообразные эксперименты. Поэтому в ходе исследования были использованы методы математического моделирования механических систем с учетом особенностей строения коры и ее поведения при изгибе ствола растущего дерева.

В качестве объекта исследования выбран характерный участок коры в сжатой зоне, деформированный вследствие изгиба. Используя рис. 3, приведем пример характерного участка коры с волнообразной поверхностью (рис. 4) и его геометрическую модель (рис. 5).

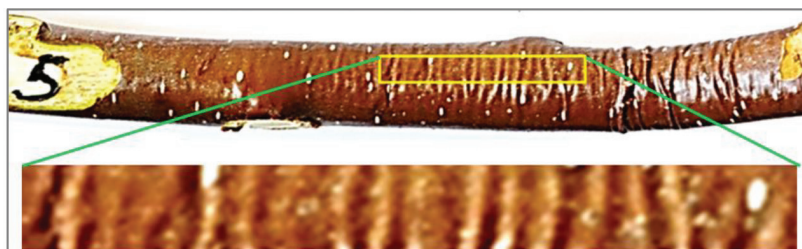


Рис. 4. Характерный участок коры с волнообразной поверхностью [7]

Fig. 4. Typical bark section with undulated surface [7]

В рамках данной статьи мы рассматриваем только относительно малый фрагмент коры, который локализован в области с наибольшими механическими напряжениями и деформациями. Рис. 4 и 5 показывают, что для приближенно-

го анализа закономерностей деформирования коры в сжатой зоне может быть использована модель гибкого стержня на упругом основании. Функции упругого основания выполняет слой камбия, примыкающие к нему живые клетки и древесина ствола (или ветви) дерева [23]. Таким образом, показанный на рис. 4 участок коры моделируется гибким стержнем на упругом основании. Продольная ось стержня ориентирована вдоль волокон ствола. Форму поперечного сечения стержня представим в виде квадрата, сторона которого равна толщине коры. При появлении сжимающих сил стержень деформируется и может перейти из прямолинейной формы равновесия в форму равновесия с искривленной осью (рис. 4 и 5, б). Такая форма продольной оси стержня (рис. 5, б) возникает как результат потери устойчивости упругого стержня на упругом основании. Явление потери устойчивости сжатого стержня на упругом основании достаточно подробно изучено и отражено в литературе [1]. Однако в известных нам публикациях не обнаружено применений теории сжатых стержней к моделированию критических деформаций коры и повреждений камбия растущего дерева при изгибе ствола и ветвей дерева под воздействием ветра.

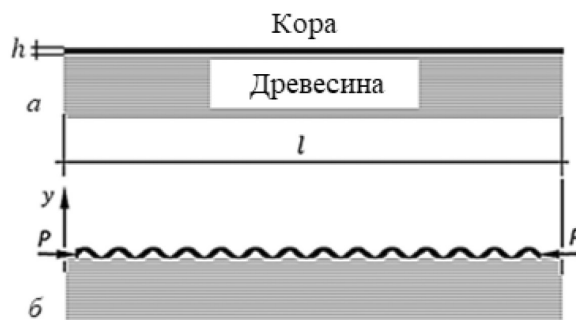


Рис. 5. Геометрическая модель характерного участка коры в сжатой зоне: до изгиба (а) и в процессе изгиба ствола дерева (или ветви) (б)

Fig. 5. Geometric model of the typical bark section in the compressed zone: before bending (a) and in the process of bending the tree trunk/branch (b)

Как показано выше, характерный участок коры в сжатой зоне растущего дерева моделируем гибким стержнем, на который действует продольная сжимающая сила $P = \sigma A$, где σ и A – соответственно напряжение в материале стержня и площадь его поперечного сечения. Кора растущего дерева с точки зрения геометрии – цилиндрическая или коническая тонкостенная оболочка, так как толщина коры мала по сравнению с диаметром ствола. Влиянием кривизны оболочки на форму поперечного сечения рассматриваемого стержня можно пренебречь, если форму поперечного сечения стержня представить в виде квадрата, сторона которого равна толщине коры h . Тогда момент инерции поперечного сечения стержня равен $\hat{I} = h^4 / 12$.

Принимая во внимание принцип Сен-Венана и достаточно большую гибкость стержня, можно предположить, что условия соединения торцов стержня с древесиной ствола мало влияют на деформации стержня. Итак, рассмотрим стержень, шарнирно опертый по торцам, связанный со сплошным упругим основанием, функции которого выполняют камбиальный слой и древесина ствола. Силы сцепления коры с древесиной сопротивляются отслоению коры. Однако отслоение появляется, если сжимающая сила достаточно велика (рис. 4 и 5, б). Отслоение коры сопровождается смещением точек на ее поверхности в радиальном направлении. Обозначим эти смещения как y . Их величина изменяется по длине стержня в интервале от нуля до высоты волны. Если прочность сцепления камбия с корой меньше прочности сцепления камбия с древесиной ствола, то камбий остается на древесине ствола и высота волны равна рассто-

янию от точки в вершине волны до слоя камбия (рис. 5, б). Силу сцепления, приходящуюся на единицу длины стержня l , обозначим как F . По физическому смыслу величина F имеет размерность N/m и является функцией $F = F(x)$, которая определяет неравномерность распределения силы сцепления, действующей в области контакта коры и камбия; в частности, при отслоении коры $F = 0$, при этом указанное выше перемещение $y > 0$.

Функцию F определим, используя следующие предположения и условия. Так как смещения в радиальном направлении достаточно малы, то по аналогии с законом Гука можно считать, что сила сцепления пропорциональна смещению, т. е. $F = cy$. Здесь c – коэффициент пропорциональности, его размерность N/m^2 .

Для моделирования деформированного состояния участка коры в сжатой зоне воспользуемся результатами исследований, известных по книге [1]. Предполагаем, что линия на рис. 5, б состоит из n полуволин синусоидальной формы. Уравнение этой линии

$$y = A \sin \frac{n \pi x}{l}. \quad (1)$$

В уравнении (1) учтены только геометрические аспекты задачи. Принимая во внимание физические и механические аспекты, запишем известное по [1] дифференциальное уравнение оси стержня в деформированном состоянии (рис. 5, б):

$$\hat{E}I \frac{d^4 y}{dx^4} + P \frac{d^2 y}{dx^2} + cy = 0, \quad (2)$$

где \hat{E} – модуль упругости материала коры, измеренный вдоль волокон.

Обозначим

$$\frac{P}{\hat{E}I} = k^2; \quad \frac{c}{\hat{E}I} = r. \quad (3)$$

Параметр r (3) связан с числом полуволин и длиной l соотношением [1]:

$$\frac{n\pi}{l} = \sqrt[4]{r}. \quad (4)$$

Используя (2) и (3), запишем однородное линейное уравнение

$$\frac{d^4 y}{dx^4} + k^2 \frac{d^2 y}{dx^2} + ry = 0. \quad (5)$$

Решение уравнения (5) и примеры его применения к анализу критического состояния сжатых тонкостенных элементов металлических конструкций представлены в [1]. Рассмотрим новое применение этого уравнения в прикладной задаче, а именно, используя уравнение (5) и соотношения (1) и (3), выполним анализ критического состояния коры в сжатой зоне растущего дерева при его изгибе от ветровой нагрузки.

Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрим методику применения представленных выше соотношений (1) и (3) и уравнения (5), которые позволяют аналитически определить критическую силу и критическое напряжение для наиболее нагруженного участка

коры в сжатой зоне при изгибе, вызванном воздействием ветра. Иными словами, смоделируем такое состояние деформированного участка коры, когда ветер вызывает искривление ствола настолько большое, что прямолинейная форма равновесия условного стержня становится неустойчивой и стержень переходит в другое устойчивое, но уже искривленное состояние равновесия. Индикатором такого состояния в теории [1] и на практике (рис. 4) является волнообразная деформация коры:

$$P_{cr}^{kop} = 2\hat{E}\hat{I}\sqrt{r} = 2\sqrt{\hat{E}\hat{I}c}. \quad (6)$$

Соответственно, критическое напряжение

$$\sigma_{cr}^{kop} = \frac{P_{cr}^{kop}}{A}. \quad (7)$$

Принимая во внимание, что $\hat{I} = h^4 / 12$ и $A = h^2$, преобразуем соотношения (6) и (7):

$$P_{cr}^{kop} = h^2 \sqrt{\hat{E}c / 3}; \quad (8)$$

$$\sigma_{cr}^{kop} = \sqrt{\hat{E}c / 3}. \quad (9)$$

Из соотношения (8) следует, что сила, вызывающая критические деформации коры в сжатой зоне при ветровой нагрузке пропорциональна квадрату толщины коры. С увеличением модуля упругости коры и сцепления коры с древесиной ствола растущего дерева критическая сила возрастает.

Согласно соотношению (9), в рамках данной модели на критическое напряжение в коре растущего дерева влияют только 2 фактора: модуль упругости коры, измеренный вдоль волокон, и указанный выше коэффициент пропорциональности c , который по своему физическому смыслу характеризует прочность сцепления коры с древесиной ствола. Однако следует принимать во внимание также влияние влажности и температуры. В летний период прочность сцепления коры с древесиной ствола существенно меньше, чем в зимний период [10]. Модуль упругости коры уменьшается, если растет влажность коры. Например, известные из литературы эксперименты подтвердили наблюдение, что сухая кора *Pinus sylvestris* более жесткая ($\hat{E} = 4700$ МПа), чем влажная ($\hat{E} = 360$ МПа) [25]. Данные о толщине коры на растущих деревьях в зависимости от породы и места замера приведены в книге [10]. Прочность сцепления древесины с корой (обозначена выше как c) зависит от вида древесных растений и может находиться в интервале от 275 до 2500 кПа [11].

Влияние изменений модуля упругости коры и адгезии коры к древесине ствола можно визуальнo оценить с помощью графиков функции (8) по рис. 6 и 7.

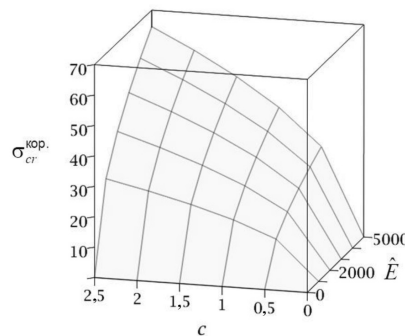
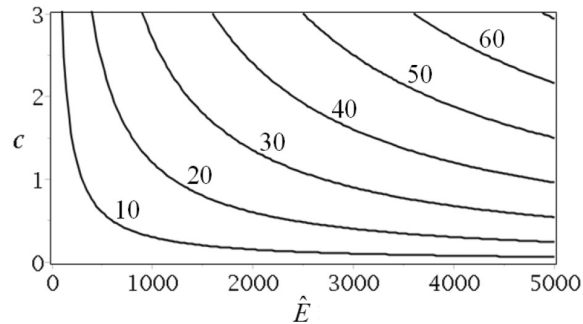


Рис. 6. Зависимость критического напряжения в сжатой зоне коры от модуля упругости коры и сцепления коры с древесиной ствола. Все значения определены в мегапаскалях

Fig. 6. Dependence of the critical stress in the compressed bark zone on the bark elasticity modulus and the bark-tree adhesion. All values are defined in megapascal

Рис. 7. Изолинии критического напряжения в сжатой зоне коры при изгибе дерева ветром ($\sigma_{cr}^{kop} = 10, 20, \dots, 60$). Все значения определены в мегапаскалях

Fig. 7. Isolines of the critical stress in the compressed bark zone at tree bending by wind ($\sigma_{cr}^{kop} = 10, 20, \dots, 60$). All values are defined in megapascal



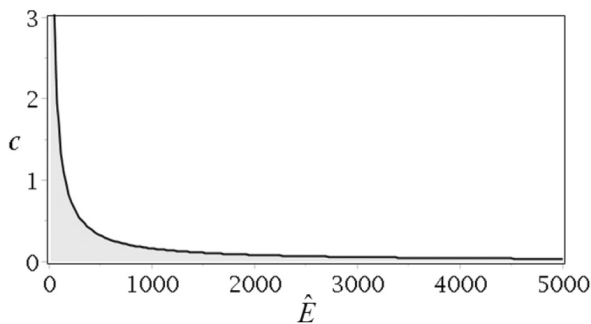
В рамках обсуждения работы воспользуемся результатами исследования [13], в котором установлено: в одном из модельных случаев ветровая нагрузка вызывает изгиб ствола растущего дерева и, соответственно, напряжение в древесине ствола, равное 22 МПа. Предполагая, что напряжение в коре может быть в диапазоне от $\sigma/10$ до $\sigma/3$, т. е. от 2,2 до 7,3 МПа, из соотношения (9) находим: критическое состояние, аналогичное показанному на рис. 5, б, реализуется, если $\hat{E}c = 3(\sigma^{kop})^2$. Данные рис. 7 подтверждают, что нельзя исключать возможность критического состояния при таком относительно небольшом воздействии. Критические деформации коры появятся, если очень мал модуль упругости коры или очень мало сцепление коры с древесиной ствола (ветви) растущего дерева. Эти 2 условия реализуются для растущих молодых деревьев (ветвей) или при высокой влажности. Однако для практики необходимы количественные оценки возможности появления критических деформаций коры в сжатой зоне растущего дерева (ветви) при ветровой нагрузке.

Представленные на рис. 7 результаты моделирования позволяют приближенно оценить вероятность появления критических деформаций коры в сжатой зоне при изгибе растущего дерева под действием ветровой нагрузки. Например, пусть $\sigma^{kop} = 7,3$ МПа, максимальные значения модуля упругости коры и сцепления коры с древесиной ствола равны соответственно 5000 и 3 МПа. Тогда, используя формулу (9), можно показать, что вероятность повреждения (p) определяется отношением закрашенной части графика на рис. 8 к площади прямоугольника, стороны которого равны c_{max} и \hat{E}_{max} . Площадь закрашенной части графика найдена интегрированием функции (9).

$$p = \frac{3(\sigma^{kop})^2}{c_{max} \hat{E}_{max}} \left(1 + \ln \left(\frac{3(\sigma^{kop})^2}{c_{max} \hat{E}_{max}} \right) \right). \quad (10)$$

Рис. 8. Результаты моделирования критической деформации коры. Все значения определены в мегапаскалях

Fig. 8. Results of modeling the bark critical deformation. All values are defined in megapascal



На рис. 8 закрашенная часть площади графика ограничена осями координат и изолинией $\sigma^{\text{кор}} = 7,3$ МПа, доля этой площади, т. е. вероятность критических деформаций коры в сжатой зоне (10), равна $p = 0,059$ (5,9 %).

Заметим, что выше рассмотрена модель критического состояния того участка коры, в котором при изгибе ствола от ветровой нагрузки появляются наибольшие деформации (рис. 4). Механическое состояние ствола дерева не рассматривалось, поскольку этот вопрос изучен с различных сторон в работах [3–5, 7, 9, 13, 14, 20, 22]. В рамках данной работы термин «критическое состояние коры в сжатой зоне при изгибе ствола дерева» означает не только потерю устойчивости прямолинейной формы равновесия условного сжатого стержня на упругом основании (в качестве механической системы), но также (как следствие) повреждение слоя камбия и других живых клеток растущего дерева (в качестве биомеханической системы).

Комментируя рис. 8, отметим также, что представленные в графической форме результаты моделирования не учитывают в явном виде скорость ветра и его метеорологические характеристики. В разработанной методике данные характеристики учтены косвенно, через напряжения в коре дерева, поскольку эти напряжения непосредственно зависят от изгибных деформаций ствола дерева, которые, в свою очередь, зависят от скорости ветра, параметров кроны дерева, влажности воздуха. Затронутый вопрос важен для лесохозяйственной практики и поэтому может составить предмет дальнейших исследований, относящихся, например, к плантационному лесоводству, где есть некоторые возможности защиты от ветрового воздействия.

Завершая обсуждение, отметим, что изгибные деформации стволов деревьев при небольшой скорости ветра могут быть несинхронными (или несинфазными), что видно на рис. 1. Существует доминирующее направление ветра – причина асимметрии формы поперечного сечения и свойств древесины [3] – данный аспект также может быть рекомендован к дальнейшему изучению.

Заключение

Разработана методика для теоретической оценки вероятности появления критических деформаций коры в сжатой зоне при изгибе растущего дерева под действием ветровой нагрузки. В качестве теоретической основы методики использованы классические исследования сжатых стержней на упругом основании. Для получения количественных оценок предложено соотношение, достаточно простое для практического применения. Адекватность результатов моделирования подтверждена их согласованностью с опытными данными. Применение методики показано на примерах.

Открытым остается вопрос: стимулирует или угнетает развитие древесного растения умеренная ветровая нагрузка? Определенный вклад в будущее решение данного вопроса вносят представленные в статье результаты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Вольмир А.С.* Устойчивость деформируемых систем. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1967. 984 с.
Vol'mir A.S. *Stability of Deformable Systems*. Moscow, Nauka Publ., 1967. 984 p. (In Russ.).
2. *Герц Э.Ф., Уразова А.Ф., Курдышева Е.В., Уразов П.Н.* Эффективность защитных лесных полос вдоль железной дороги // Вестн. АГАТУ. 2021. № 1(1). С. 56–60.
Gerts E.F., Urazova A.F., Kurdyшева E.V., Urazov P.N. Effectiveness of Protective Forest Strips along the Railway. *Vestnik ASAU*, 2021, no. 1(1), pp. 56–60. (In Russ.).
3. *Глухих В.Н., Черных А.Г.* Обоснование овальности формы сечений стволов деревьев при их росте с наклоном // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 5. С. 166–175.
Glukhikh V.N., Chernykh A.G. Reasoning of Tree Cross Sections Oval Shaping while Growing with an Inclination. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2020, no. 5, pp. 166–175. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-5-166-175>
4. *Григорьева О.И., Григорьев И.В., Давтян А.Б., Иванов В.А., Гринько О.И., Швабова Н.В., Калита А.Ю.* Влияние ветровой нагрузки на образование пороков в растущих деревьях // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 2(50). С. 63–69.
Grigorjeva O.I., Grigorjev I.V., Davtyan A.B., Ivanov V.A., Grinko O.I., Shvabova N.V., Kalita A.Yu. Influence of Wind Load on the Formation of Defects in Growing Trees. *Systems. Methods. Technologies*, 2021, no. 2(50), pp. 63–69. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2021-2-63-69>
5. *Куницкая О.А., Никитина Е.И.* Экологические аспекты выборочных рубок леса // Эколого-экономические и технологические аспекты устойчивого развития Республики Беларусь и Российской Федерации: сб. ст. III Междунар. науч.-техн. конф. «Минские научные чтения-2020»: в 3 т. Минск: БГТУ, 2021. Т. 1. С. 286–291.
Kunitskaya O.A., Nikitina E.I. Ecological Aspects of Shelterwood Cutting. *Ecological, Economic and Technological Issues of Sustainable Development of the Republic of Belarus and the Russian Federation: Collection of Academic Papers of the III International Scientific and Technical Conference "Minsk Scientific Readings-2020"*: In 3 Vol. Minsk, BelSTU Publ., 2021, vol. 1, pp. 286–291. (In Russ.).
6. *Куницкая О.А., Швецова В.В., Тихонов Е.А.* Современное деревянное судостроение в России // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2021. № 6. С. 3–12.
Kunitskaya O.A., Shvetsova V.V., Tikhonov E.A. Modern Wooden Shipbuilding in Russia. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya = Repair. Recovery. Modernization*, 2021, no. 6, pp. 3–12. (In Russ.). <https://doi.org/10.31044/1684-2561-2021-0-6-3-12>
7. *Куницкая О.А., Колесников Г.Н., Лукин А.Е., Григорьев И.В.* Повышение эффективности групповой окорки длинномерных лесоматериалов. Петрозаводск: ПетрГУ, 2016. 107 с.
Kunitskaya O.A., Kolesnikov G.N., Lukin A.E., Grigorev I.V. *Improving the Efficiency of Group Debarking of Long-Cut Timber*. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2016. 107 p. (In Russ.).
8. *Никитина Т.А., Шестаков Ю.Д., Лабудин Б.В., Куницкая О.А., Тихонов Е.А., Калита А.Ю.* Прочностной ресурс древесины лиственницы Беломорского Севера при сжатии в главных и диагональных осях анизотропии // Деревообработ. пром-сть. 2020. № 4. С. 21–31.
Nikitina T.A., Shestakov Yu.D., Labudin B.V., Kunitskaya O.A., Tikhonov E.A., Kalita A.Yu. Strength Resource of Larch Wood of the White Sea North under Compression in the Main and Diagonal Axes of Anisotropy. *Derevoobrabatativaushaya promishlennost' = Wood-working industry*, 2020, no. 4, pp. 21–31. (In Russ.).

9. Тамби А.А., Юркова О.В., Куницкая О.А., Степанищева М.В. Исследование влияния физических свойств и строения древесины сосны на ее прочность // Системы. Методы. Технологии. 2017. № 4(36). С. 157–161.
- Tambi A.A., Yurkova O.V., Kunitskaya O.A., Stepanishcheva M.V. Research of the Influence of the Physical Properties and Structure of Pine Wood on Its Strength. *Systems. Methods. Technologies*, 2017, no. 4(36), pp. 157–161. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2017-4-157-161>
10. Цывин М.М. Использование древесной коры. М.: Лесн. пром-сть, 1973. 94 с.
- Tsyvin M.M. *The Use of Tree Bark*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1973. 94 p. (In Russ.).
11. Chahal A., Ciolkosz D. A Review of Wood-Bark Adhesion: Methods and Mechanics of Debarking for Woody Biomass. *Wood and Fiber Science*, 2019, vol. 51, no. 3, pp. 288–299. <https://doi.org/10.22382/wfs-2019-027>
12. Falťan V., Katina S., Minár J., Polčák N., Bánovský M., Maretta M., Zámečník S., Petrovič F. Evaluation of Abiotic Controls on Windthrow Disturbance Using a Generalized Additive Model: A Case Study of the Tatra National Park, Slovakia. *Forests*, 2020, vol. 11, iss. 12, art. 1259. <https://doi.org/10.3390/f11121259>
13. Gaffrey D., Kniemeyer O. The Elasto-Mechanical Behaviour of Douglas Fir, Its Sensitivity to Tree-Specific Properties, Wind and Snow Loads, and Implications for Stability – A Simulation Study. *Journal of Forest Science*, 2002, vol. 48, no. 2, pp. 49–69. <https://doi.org/10.17221/11856-JFS>
14. Kärhä K., Anttonen T., Poikela A., Palander T., Laurén A., Peltola H., Nuutinen Y. Evaluation of Salvage Logging Productivity and Costs in Windthrown Norway Spruce-Dominated Forests. *Forests*, 2018, vol. 9, iss. 5, art. 280. <https://doi.org/10.3390/f9050280>
15. Krišāns O., Matisons R., Kitenberga M., Donis J., Rust S., Elferts D., Jansons Ā. Wind Resistance of Eastern Baltic Silver Birch (*Betula pendula* Roth.) Suggests Its Suitability for Periodically Waterlogged Sites. *Forests*, 2021, vol. 12, iss. 1, art. 21. <https://doi.org/10.3390/f12010021>
16. Kunickaya O., Runova E., Chzhan S., Zhuk A., Markov O., Garus I., Nikiforova V., Ivanov V. Improving Impregnation Techniques for Fine Coniferous and Non-Coniferous Wood. *Journal of Applied Engineering Science*, 2020, vol. 18, no. 4, pp. 520–528. <https://doi.org/10.5937/jaes0-27654>
17. Kunickaya O., Tanyukevich V., Khmeleva D., Kulik A., Runova E., Savchenkova V., Voronova A., Lavrov M. Cultivation of the Targeted Forest Plantations. *Journal of Environmental Treatment Techniques*, 2020, vol. 8, iss. 4, pp. 1385–1393. [https://doi.org/10.47277/JETT/8\(4\)1393](https://doi.org/10.47277/JETT/8(4)1393)
18. Kunickaya O.A., Shadrin A.A., Burmistrova O.N., Markov O.B., Gasparyan G.D., Davtyan A.B., Lapshina M.L., Sleptsova N.A., Ustinova V.V., Kruzhilin S.N. Wood Treatment with Hydro Impact: A Theoretical and Experimental Study. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 2019, vol. 25, suppl. 2, pp. 158–166.
19. Kunickaya O.A., Shadrin A.A., Kremleva L.V., Mueller O.D., Ivanov V.A., Bederdinova O.I., Kruchinin I.N., Burgonutdinov A.M., Zakharova O.I., Struchkov N.A. Modeling of the Processes of the Modification of the Current Volume Warming by Drainage and Pressing. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 2019, vol. 25, suppl. 2, pp. 167–177.
20. Mayr S., Bertel C., Dämon B., Beikircher B. Static and Dynamic Bending Has Minor Effects on Xylem Hydraulics of Conifer Branches (*Picea abies*, *Pinus sylvestris*). *Plant, Cell & Environment*, 2014, vol. 37, iss. 9, pp. 2151–2157. <https://doi.org/10.1111/pce.12307>
21. Morkovina S.S., Kunickaya O., Dolmatova L., Markov O., Nguyen V.L., Baranova T., Shadrina S., Grin'ko O. Comparative Analysis of Economic Aspects of Growing Seedlings with Closed and Open Root Systems: The Experience of Russia. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 2021, vol. 18, iss. 2, pp. 19–26.

22. Peltola H., Kellomäki S., Hassinen A., Granander M. Mechanical Stability of Scots Pine, Norway Spruce and Birch: An Analysis of Tree-Pulling Experiments in Finland. *Forest Ecology and Management*, 2000, vol. 135, iss. 1-3, pp. 143–153. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00306-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00306-6)

23. Trockenbrodt M. Survey and Discussion of the Terminology Used in Bark Anatomy. *IAWA Bulletin*, 1990, vol. 11(2), pp. 141–166. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000511>

24. Urquiza Muñoz J.D., Magnabosco Marra D., Negrón-Juarez R.I., Tello-Espinoza R., Alegría-Muñoz W., Pacheco-Gómez T., Rifai S.W., Chambers J.Q., Jenkins H.S., Brenning A., Trumbore S.E. Recovery of Forest Structure Following Large-Scale Windthrows in the Northwestern Amazon. *Forests*, 2021, vol. 12, iss. 6, art. 667. <https://doi.org/10.3390/f12060667>

25. Wenig C., Dunlop J.W.C., Hehemeyer-Cürten J., Reppe F.J., Horbelt N., Krauthausen K., Fratzi P., Eder M. Advanced Materials Design Based on Waste Wood and Bark. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2021, vol. 379, iss. 2206, art. 20200345. <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0345>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья

УДК 630*811

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-5-114-130

Размерно-качественные характеристики круглых сортиментов, заготавливаемых с применением многооперационных лесных машин

К.Д. Жук¹, аспирант; *ResearcherID:* [T-6299-2017](https://orcid.org/0000-0003-0619-1242),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0619-1242>

С.А. Угрюмов¹, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID:* [F-6510-2016](https://orcid.org/0000-0002-8077-3542),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8077-3542>

Ф.В. Свойкин², канд. техн. наук; *ResearcherID:* [AAC-4074-2020](https://orcid.org/0000-0002-8507-9584),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8507-9584>

В.Ф. Свойкин², канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID:* [AAQ-8212-2020](https://orcid.org/0000-0001-8989-4626),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8989-4626>

¹Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, литер У, Санкт-Петербург, Россия, 194021; zhuk_kd@mail.ru, ugr-s@yandex.ru

²Сыктывкарский лесной институт филиал Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С.М. Кирова, ул. Ленина, д. 39, г. Сыктывкар, Республика Коми, Россия, 167982; svoykinvf@mail.ru, svoykin_fv@mail.ru

Поступила в редакцию 09.04.21 / Одобрена после рецензирования 12.07.21 / Принята к печати 18.07.21

Аннотация. При работе многооперационных лесных машин необходимо проводить статистическую оценку параметров и объемов заготовленной древесины с целью увеличения выхода круглых лесоматериалов и повышения общей производительности лесозаготовительных работ. Современные валочно-сучкорезно-раскряжевные машины оборудованы множеством датчиков системы контроля-управления архитектуры CAN, а также имеют в бортовой системе программное обеспечение, способное собирать и сохранять входные данные по разным типам файлов для поддержания непрерывной корректной работы машины. Одним из основных типов файлов являются форматы .stm (файлы ствола). Эти файлы представляются в двух видах: одни содержат информацию по каждому отдельному стволу дерева в разных файлах, а другие хранят все данные по всем стволам в одном. При анализе работ, проведенных на лесосеке, самым актуальным является применение второго типа stm-файлов. Однако использовать каждый раз файлы .stm для получения информации неудобно, поэтому возникает необходимость в преобразовании исходных данных в табличный формат для простоты их трансфера и принятия решений в условиях риска и неопределенности. Предложена методика трансфера таких данных в табличный формат .csv с помощью библиотек языка программирования Python pandas, numpy, seaborn, matplotlib, которые помогают быстро и эффективно обрабатывать большие массивы данных и отображают их графически. При трансфере были использованы данные, полученные при работе двух операторов на машине среднего класса Ponsse Ergo 8W в типичных природно-производственных условиях арендной базы АО «Монди СЛПК» (Республика Коми, зона средней тайги). Оценена эффективность работы операторов. Получены функции для определения объема ствола дерева на основе отчетных данных с лесных машин.

© Жук К.Д., Угрюмов С.А., Свойкин Ф.В., Свойкин В.Ф., 2022

Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

Анализ структурированных данных о работе многооперационных лесных машин способствует совершенствованию принятия решений при последующей валке деревьев с выбором породы, что обеспечивает наибольший объем выхода круглых лесоматериалов. Кроме того, есть возможность корректировать сортиментные таблицы (АРТ-матрицы) для кратко- и среднесрочного планирования объемов заготовки сортиментов.

Ключевые слова: валочно-сучкорезно-раскряжевочная машина, stm-файл, файл ствола, StanForD2010, харвестер, производительность валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины, Python, pandas, .csv, скандинавская сортиментная технология заготовки древесины

Для цитирования: Жук К.Д., Угрюмов С.А., Свойкин Ф.В., Свойкин В.Ф. Размерно-качественные характеристики круглых сортиментов, заготавливаемых с применением многооперационных лесных машин // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 5. С. 114–130. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-114-130>

Original article

Dimension and Quality Specifications of Round Logs Harvested with the Use of Multi-Operational Forest Machines

Kirill D. Zhuk¹, Postgraduate Student, ResearcherID: [T-6299-2017](https://orcid.org/0000-0003-0619-1242),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0619-1242>

Sergey A. Ugryumov², Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [F-6510-2016](https://orcid.org/0000-0002-8077-3542),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8077-3542>

Fedor V. Svoikin², Candidate of Engineering; ResearcherID: [AAC-4074-2020](https://orcid.org/0000-0002-8507-9584),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8507-9584>

Vladimir F. Svoikin², Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAQ-8212-2020](https://orcid.org/0000-0001-8989-4626), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8989-4626>

¹Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, liter U, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; zhuk_kd@mail.ru, ugr-s@yandex.ru[✉]

²Syktvykar Forestry Institute (Branch) of Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, ul. Lenina, 39, Syktvykar, 167982, Russian Federation; svoykinvf@mail.ru, svoykin_fv@mail.ru

Received on April 9, 2021 / Approved after reviewing on July 12, 2021 / Accepted on July 18, 2021

Abstract. It is necessary to carry out a statistical assessment of the harvested wood parameters in order to increase the yield of round timber and the overall productivity of logging operations while operating multi-operational forest machines. Modern forestry harvesters are equipped with a variety of CAN control sensors to monitor operation and have onboard software that can collect and store input data on various file types to ensure continuous correct operation. One of the main file types is STM (trunk files). These files are presented in two forms: some contain information for each individual tree trunk in different files, and others store all the data for all trunks in one. The second type of STM files is the most relevant when analyzing the operations carried out at the logging site. However, it is inconvenient to use STM files every time to get information, so there is a need to convert the initial data into a table for easy transfer and decision-making at risk and uncertainty. The article proposes a method for transferring



such data to a CSV table using Python pandas, numpy, seaborn, matplotlib programming language libraries, which help to process large data arrays quickly and efficiently and display them graphically. The data obtained by two operators using a medium-class Ponsse Ergo 8W machine in the typical natural and production conditions of the Mondi Syktyvkar JSC (Komi Republic, middle taiga zone) were used for the transfer. The efficiency of the operators' work was assessed. We obtained functions for determining the volume of a tree trunk on the basis of the reported data from the forest machines. The analysis of structured data on the operation of multi-operational forest machines helps to improve decision-making during subsequent felling of trees with the selection of species, which provides the largest volume of round timber output. Moreover, it is possible to adjust assortment tables (APT-matrices) for short- and medium-term planning of assortment harvesting volumes.

Keywords: multi-operational forest machine, STM file, trunk file, StanForD2010, harvester, multi-operational forest machine productivity, Python, pandas, .csv, Scandinavian cut-to-length technology (CTL-technology)

For citation: Zhuk K.D., Ugrumov S.A., Svoikin F.V., Svoikin V.F. Dimension and Quality Specifications of Round Logs Harvested with the Use of Multi-Operational Forest Machines. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 5, pp. 114–130. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-114-130>

Введение

В лесопромышленном комплексе РФ на данный момент основной упор при использовании скандинавской сортиментной технологии заготовки древесины делается на производство круглых лесоматериалов [1], обладающих максимальной рыночной стоимостью по критерию качества [10]. Для производства круглых лесоматериалов в основном применяют высокопроизводительную специализированную многооперационную лесозаготовительную технику (пришедшую на замену ручному моторному инструменту [16]), оснащенную современными техническими решениями и программными комплексами [6], повышающими эффективность заготовки древесной продукции [4, 5, 11, 13, 17]. Однако при достаточно большой скорости обработки древесной продукции возникает проблема, которая заключается в качестве и в процентном выходе относительно предмета труда древесины в круглом виде [10, 11]. Здесь играет роль большое количество факторов: внешней среды – таксационные характеристики насаждений, природно-производственные, климатические и рельефные условия арендной базы лесозаготовительного предприятия; внутренние факторы – состояние лесной машины, ее техническая и технологическая готовность, используемый функционал; квалификация, опыт и мотивация оператора, уровень его диджитализации [2, 3, 20, 21].

При переходе от экстенсивной модели ведения лесного хозяйства к интенсивной в РФ в части заготовки древесины многооперационными лесными машинами по сортиментной технологии транслируется опыт Скандинавских стран не только в части техники и технологии, но и организации труда операторов. Так, крупнейшие лесозаготовители Северо-Западного федерального округа (АО «Монди СЛПК», АО «Группа «ИЛИМ»») активно тестируют как более корректный показатель эффективности операторов лесных машин почасовую оплату труда, общепринятую в Скандинавских странах

(а не сделанную, т. е. за количество заготовленного–перемещенного предмета труда, принятую в РФ). Показатель эффективности операторов «почасовая оплата труда» является одним из важнейших критериев, который в Скандинавских странах определяется количеством обработанных стволов в 1 ч. Это позволяет уйти от дифференцированного подхода «Предмет труда–оператор–лесная машина» и перейти к системному подходу планирования производственного процесса в сложной вероятностной системе, осуществлять управление процессом в условиях дефицита информации.

Данные, которые считываются с датчиков лесной машины, записываются в ее бортовую систему [18, 19, 22]. Они хранятся в различных форматах, что позволяет структурировать информацию. Основные файлы, содержащие сведения о каждом прошедшем через харвестерную головку (ХГ) и зарегистрированном системой контроля–измерения дереве, имеют формат .stm [8]. Данные в таком файле построены с применением стандарта StanForD2010 [15, 26].

Стоит отметить, что, например, в Чешской Республике, где высока доля альтернативных скандинавской сортиментной технологии способов заготовки и первичной вывозки древесины в круглом виде с использованием катаных трелевочных установок, применяют старый формат записи и хранения данных по стандарту StanForD Classic. Однако в большинстве европейских стран используется современный стандарт StanForD2010. Основные производители решений для скандинавской сортиментной технологии заготовки древесины сортиментами в РФ (John Deere Forestry, Rottne AB, Komatsu Forest AB, Ponsse Oy, Tigercat, Dasa AB, LogMax AB, Parker, Hannifin Corp., Technion Oy, LogSet Oy, ForestPHD, Biometria (бывший SDC), CGI, Skog-Data, Coillté) практикуют именно стандарт StanForD2010, на данный момент являющийся универсальным, межплатформенным и общепринятым в мировой практике отрасли.

Для «чтения» и расшифровки stm-файлов применяют различные программные продукты от компаний-производителей лесозаготовительной техники и оборудования (ХГ, систем измерения и т. д.). На рынке представлен широкий спектр программ для обработки данных, получаемых с бортовой системы валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины (ВСРМ). Файлы в формате .stm могут быть использованы для исследования собранных в ходе работы ВСРМ данных. Существует два вида stm-файлов. Один вид хранит всю информацию по всем обработанным (снятым с пня) стволам за выбранный период времени в одном файле. Другой вид вмещает данные по каждому отдельному стволу в отдельном файле, т. е. файлов несколько.

Для повышения эффективности управления лесными ресурсами в условиях риска и неопределенности принятия решений на каждом этапе многоступенчатого технологического процесса на основании передового опыта Скандинавских стран следует анализировать полученные данные о заготовленной продукции с многооперационных лесных машин, особенно ВСРМ [23, 24]. Таким образом, возникает потребность в частом дальнейшем использовании stm-файлов для анализа лесозаготовительного процесса, что при хранении данных в отдельных stm-файлах или в одном целом stm-фай-

ле не всегда удобно по причине затрудненности доступа и отсутствия межплатформенности (протокол StanForD2010 доступен только на лесных машинах и при установке специализированного программного обеспечения (ПО) от производителей такой техники).

Для решения этой задачи найдено решение [9]. В развитие темы предлагается использовать формат .csv, обеспечивающий хранение данных в одной объемной таблице и простой доступ к ним. К тому же данные в таком формате удобно анализировать средствами языков программирования Python [7, 12, 14]. К примеру, можно применять библиотеку pandas, которая предоставляет широкие возможности для работы и анализа табличных данных в формате .csv. Предложен вариант конвертации данных из одного обширного stm-файла в формат .csv для дальнейшего анализа с учетом возможности усовершенствования обработки информации лицом, принимающим решения (ЛПР), для повышения выхода круглых лесоматериалов путем оптимального раскроя отдельного древесного ствола на основании АРТ-матриц.

Объекты и методы исследования

При наборе данных особое внимание уделялось калибровке ХГ электронной мерной вилкой Haglof DP и соответствующим программным настройкам систем контроля – измерения базовой машины для обеспечения сходимости результатов измерений датчиками ХГ с фактическими параметрами круглых лесоматериалов. Калибровка ХГ осуществлялась по аналогии с опытом Скандинавских стран, т. е. 4 раза в смену (в РФ периодичность калибровки ХГ зачастую недостаточная, что приводит к расхождению показателей датчиков ХГ с реальными параметрами сортиментов, это является одной из причин снижения выхода деловых круглых лесоматериалов).

Проведен анализ данных, которые были получены с одной ВСРМ двумя операторами за типичный день в марте 2021 г. Для определения наиболее типичного дня предварительно проанализированы данные за четыре 2-недельных периода (вахты) с разных кварталов (№ 10, 44, 45, 46, 78), т. е. за 56 сут. с общим количеством обработанных ХГ и зарегистрированных стволов – 58 359 (согласно PRD-отчетам и информации из stm-файлов с программного комплекса (ПК) ВСРМ). Принято допущение, что данные по учету заготовленной древесины по информации из stm-файлов совпадают с PRD-отчетом и с материально-денежной оценкой лесосеки. Экспериментальные данные по размерным характеристикам заготовленной древесины получены при проведении полевых испытаний в типичных природно-производственных условиях средней тайги Республики Коми на арендной базе предприятия АО «Монди СЛПК» (Корткеросский район, 150 км от с. Корткерос, Постакеросское участковое лесничество, квартал 78, делянка 2). Породный состав насаждений – 6С3Б0с, средний объем хлыста – 0,31 м³. Используются ВСРМ Ponsse Egro 8W [25, 27, 28] 2018 года выпуска и ХГ Н7 (наработка – 14 561 м/ч), а также система контроля–измерения Ponsse Opti4G [29].

Результаты исследования и их обсуждение

Входными данными является сформированный список данных, которые необходимо получить для составления информативной таблицы в формате .csv. Часть данных для конвертации может быть считана из общего stm-файла, а другая часть будет вычисляться на основе полученной информации. На рис. 1 изображен фрагмент данных в формате .stm, построенных по стандарту StanForD2010.

```

~297 1 1 1 1 1~298 1 1 1 1 1~845 1 22~846 1 100 150 200 250 300 350
20200608202350_33113_84328~299 1 482 296 101 67~299 2 482 296 101 6
84328
84329
84330
84331~306 2 0 0 0 0~361 1 1~361 2 1~361 3 0~361 4 1~361 5 200~361 6
Kuitu~541 2
2~542 1 64~543 1 1200~544 1 547 329 112 74~110 2 1~270 1 33114~270
Дмитрий Иванов~38 4 0~38 5 0~303 2 200~269 2 10~271 2 0~272 2 1237~
Q1~281 1 195~290 1 4~291 5 214 174 148 100~292 5 203 165 141 95~293
Unclassified
пил. кр
пил. сред.
бал.~296 3
0
101
103
104~296 4 0 2 2 2~832 2
0

```

Рис. 1. Фрагмент общего файла .stm

Fig. 1. Fragment of the general STM file

Для формирования файла формата .csv применяются следующие переменные из файла .stm:

- 31 2 – информация о регионе, в котором производилась заготовка;
- 38 1 – идентифицирующая оператора информация – имя и фамилия;
- 110 1(2) – информация о породе обрабатываемого дерева;
- 270 1 – информация о номере ствола;
- 120 1 – информация о наборе пород;
- 273 3 – информация о стартовом (начальном) диаметре ствола (в комле) и набор последующих разниц;
- 291 5 – информация о диаметре всех сортиментов в верхнем торце (резе);
- 293 5 – массив с длинами всех сортиментов.

Стоит отметить, что переменная 291 5 содержится только в общем stm-файле. В отдельных файлах вместо данной переменной есть другая, которая вмещает уже высчитанные объемы для каждого бревна. Вычисляемые параметры следующие: длина ствола, массив с объемами сортиментов, массив со сбегам для каждого сортимента, максимальный сбег, минимальный сбег, объем ствола, диаметр ствола на высоте груди (1,3 м).

Для того чтобы осуществить конвертацию данных из формата .stm в .csv, следует использовать библиотеки языка программирования Python numpy и pandas.

Фрагмент программного кода для конвертации файла .stm в csv-формат приведен на рис. 2.

```
17     region = ""
18     spec_list = ""
19
20     for code in stm:
21         if code == "":
22             continue
23
24         parts = code.split(" ", 2)
25
26         if parts[0] == "31" and parts[1] == "2":
27             region = parts[2]
28
29         if parts[0] == "120" and parts[1] == "1":
30             spec_list = parts[2].split(" ")
31
32         if parts[0] == "38" and parts[1] == "1":
33             stm_operator = np.append(stm_operator, parts[2])
34
35     # может быть код переменной для породы как 1 так и 2
36
37     if parts[0] == "110" and parts[1] == "1":
38         stm_spec = np.append(stm_spec, parts[2])
39
```

Рис. 2. Фрагмент кода программы для конвертации в csv-формат

Fig. 2. A fragment of the program code for conversion as a CSV file

В самом stm-файле переменные, которые хранят данные, отделяются знаком «тильда». В таблице ASCII этот символ имеет обозначение «126». При считывании данных весь файл необходимо разбить на части, используя такой символ. В итоге получается большой массив данных, в котором осуществляется поиск необходимой информации в соответствии с кодами переменных. Сама переменная и ее тип отделяются пробелами. Аналогичным образом происходит отделение массивов данных. Предлагаемый подход удобен при разбиении элемента из общего массива данных. На выходе получаются три элемента. Первый элемент имеет код переменной (уникальный номер, указанный в стандарте StanForD2010), второй хранит тип текущей переменной, а третий – данные, содержащиеся в этой переменной. У одной переменной может быть несколько типов, поэтому при считывании необходимо указывать не только ее код, но и тип. Только в этом случае данные будут корректно считаны.

Не стоит исключать возможности, что записанные из бортовой системы ВСРМ данные будут сохранены не в полной мере, учитывая экстремальные природно-производственные условия работы лесных машин (перепады температур, повышенная влажность, механические повреждения, неблагоприятное воздействие на модули и контроллеры почвенно-грунтовых факторов, лесного настила, порубочных остатков, грязи и т. д.). Чтобы убедиться в корректности полученной информации, необходимо проверить считанные данные путем сравнения длин заполненных массивов. Если длины будут равны, то данные считаны верно. В противном случае системе нужно сигнализировать об ошибке.

Тогда для создания таблицы в формате .csv необходимо проанализировать файлы для каждого ствола в отдельности. После проверки данных на наличие ошибок можно использовать полученный csv-файл.

На рис. 3 изображен фрагмент таблицы в формате .csv. Для удобства и комфорта конечного пользователя был использован инструмент Jupyter Notebook, позволяющий работать с таблицами в интерактивном режиме. При анализе полученных таблиц можно заметить, что в колонке «is_correct» содержатся два значения: «True» и «False». Значение «False» сигнализирует о том, что для колонки «diam_diff» были получены некорректные данные. При анализе необходимо это учитывать и исключать по возможности такие данные.

	start_diam	diam_diff	top_diams	length_asrt	bot_top_diams	sbegs	sbeg_min	sbeg_max	volumes	total_length	total_volumes	DBH	region	is_correct
215	-11 3 3 3 3 3 3 4 5 3 1 0 0 0 0 1 1 2 1 0 0 2 ...	214 174 148 100	10 414 412 401	[[215.0, 214.0], [214.0, 174.0], [174.0, 148.0...]]	[0.1, 0.097, 0.063, 0.12]	0.063	0.120	[0.0036, 0.1228, 0.0841, 0.049]	1237	0.2595	195	Помоздино	False	
222	0 1 0 1 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 4 2 1 1 0 0 1 ...	197 170 121 90	414 414 411 191	[[222.0, 197.0], [197.0, 170.0], [170.0, 121.0...]]	[0.06, 0.065, 0.119, 0.162]	0.060	0.162	[0.1429, 0.1087, 0.089, 0.0188]	1430	0.3384	217	Помоздино	True	
136	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 1 2 2 0 0 0 ...	124 90 76	414 402 193	[[136.0, 124.0], [124.0, 90.0], [90.0, 76.0]]	[0.029, 0.085, 0.073]	0.029	0.085	[0.055, 0.0395, 0.0105]	1009	0.1020	136	Помоздино	True	
173	0 1 1 1 0 1 1 0 0 1 1 4 4 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ...	148 127 95	404 399 401	[[173.0, 148.0], [148.0, 127.0], [127.0, 95.0]]	[0.062, 0.053, 0.08]	0.053	0.080	[0.0819, 0.0594, 0.0391]	1204	0.1804	158	Помоздино	True	
305	9 9 10 9 10 9 10 13 18 8 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ...	200 168	415 414	[[305.0, 200.0], [200.0, 168.0]]	[0.253, 0.077]	0.077	0.253	[0.2108, 0.1104]	829	0.3212	200	Помоздино	True	
173	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 1 1 2 2 1 1 ...	153 131 96 70	413 411 400 194	[[173.0, 153.0], [153.0, 131.0], [131.0, 96.0]...]]	[0.048, 0.054, 0.087, 0.134]	0.048	0.134	[0.0883, 0.0652, 0.0408, 0.0106]	1418	0.2029	173	Помоздино	True	

Рис. 3. Фрагмент таблицы в csv-формате
Fig. 3. A fragment of a table in the CSV file

Таким образом, переводя файлы из .stm в .csv, можно анализировать данные в более удобном и наглядном формате. Пакет pandas позволяет быстро и эффективно изучить полученные данные.

После экспорта данных в формат .csv они могут быть использованы ЛПП для аналитики сводных данных по производству сортиментов ВСРМ для корректировки АРТ-матриц. Например, Jupyter Notebook дает возможность получить сводную таблицу с базовыми статистическими показателями для количественных переменных. На рис. 4 представлена сводная таблица со следующими статистическими показателями: mean – выборочное среднее значение по всем строкам; std – стандартное отклонение; min – минимальное значение для каждого столбца; 25 % – нижний квантиль; 50 % – медианное значение; 75 % – верхний квантиль; max – максимальное значение для каждого столбца.

Для примерной оценки производительности работы оператора ВСРМ будем использовать объем заготовленной оператором продукции с одного ствола дерева. Подсчитаем количество всех стволов по каждой отдельной породе для каждого оператора, а также вычислим весь объем заготовленной древесины по каждой из пород.

	stem_number	start_diam	sbeg_mean	sbeg_min	sbeg_max	total_length	total_volumes	DBH
count	1385.000000	1385.000000	1385.000000	1385.000000	1385.000000	1385.000000	1385.000000	1385.000000
mean	1343.000000	168.622383	0.085243	0.030976	0.156744	1299.976173	0.217051	162.889531
std	399.959373	53.808719	0.036762	0.049332	0.098179	471.857027	0.185593	49.402090
min	651.000000	56.000000	-0.110000	-0.800000	0.012000	403.000000	0.013400	44.000000
25%	997.000000	128.000000	0.062000	0.012000	0.101000	934.000000	0.083300	125.000000
50%	1343.000000	159.000000	0.078000	0.032000	0.130000	1341.000000	0.156900	154.000000
75%	1689.000000	203.000000	0.099500	0.052000	0.178000	1684.000000	0.298300	194.000000
max	2035.000000	431.000000	0.309750	0.235000	1.020000	4689.000000	1.466700	379.000000

Рис. 4. Сводная таблица в формате .csv по исходным данным

Fig. 4. The summary table based on the initial data in the CSV file

На рис. 5 изображен фрагмент сравнительной таблицы для осуществления оценки производительности операторов.

operator	spec	total_volumes	coeff_(tv/spec)
Николай	Береза	53	12.0931
	Ель	275	46.6433
	Осина	326	95.1447
Талгат	Береза	52	11.7149
	Ель	282	28.2767
	Осина	397	106.7434

Рис. 5. Фрагмент таблицы в формате .csv для оценки производительности операторов

Fig. 5. Operator performance evaluation table in the CSV file

Последний столбец (рис. 5) вычислен путем деления общего объема заготовленной древесины для отдельной породы каждым оператором на общее количество обработанных стволов. Таким образом, получаем среднее значение объема, который оператор вырабатывает с одного ствола дерева. Анализируя данные на рис. 5, можно заметить, что при работе с породой «береза» у операторов производительность практически одинакова, а ее среднее значение составляет 0,2267. При работе с породой «осина» отличие среднего значения небольшое. Однако операторы показали существенные различия, работая с породой «ель». При данной методике оценки производительности различия у операторов были примерно в 1,7 раза. У оператора «Николай» в среднем получался больший объем заготавливаемой древесины с одного ствола, чем у оператора «Талгат». Данная методика может быть рекомендована при первичной оценке производительности операторов, поскольку вероятны сильно отклоняющиеся значения от среднего в представленной выборке, что дает завышенную оценку показателю производительности.

Таким образом, используя формат данных .csv совместно с языком программирования Python, можно проводить оперативную оценку полученных данных. Данные, которые хранятся в файлах, сконфигурированные системой контроля–управления–измерения ВСРМ (.stm, .prd, .drf), формируются с использованием стандарта StanForD2010. Подавляющее большинство ВСРМ в РФ работают с использованием этого стандарта, что позволяет корректно извлекать данные с лесных машин различных производителей.

Полученные файлы читаются как обычные текстовые файлы и открываются с применением встроенных функций языка Python. Это обеспечивает корректный трансфер информации.

При анализе данных, полученных с бортового ПК ВСРМ, помимо их количественной оценки, существует возможность просмотра влияния и зависимости исходных параметров друг от друга.

Регрессионная модель зависимости объема дерева от нижнего диаметра представлена формулой

$$f(x)_{\text{осина}} = -5,96 \cdot 10^{-8} x^3 + 4,33 \cdot 10^{-5} x^2 - 6,19 \cdot 10^{-3} x + 0,312, \quad (1)$$

а на рис. 6 изображен график этой зависимости.

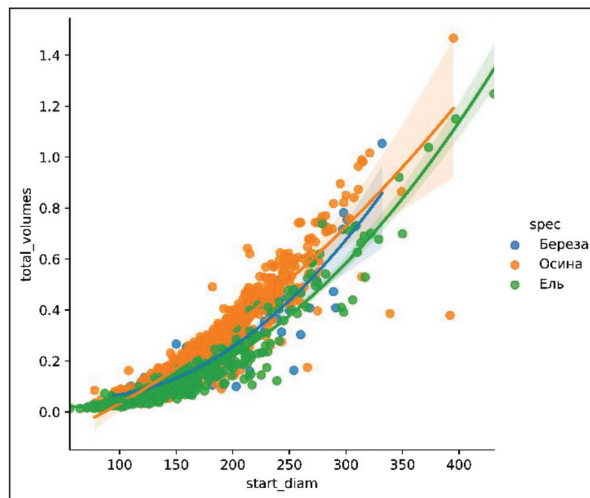


Рис. 6. Зависимость объема дерева от нижнего диаметра. Библиотека seaborn языка программирования Python

Fig. 6. Dependence diagram of the tree volume on the lower diameter. The seaborn library of the Python programming language

Регрессионная модель зависимости длины ствола от нижнего диаметра:

$$f(x)_{\text{ель}} = -6,58 \cdot 10^{-9} x^3 + 1,36 \cdot 10^{-5} x^2 - 1,85 \cdot 10^{-3} x + 0,0962. \quad (2)$$

На рис. 7 показан график такой зависимости.

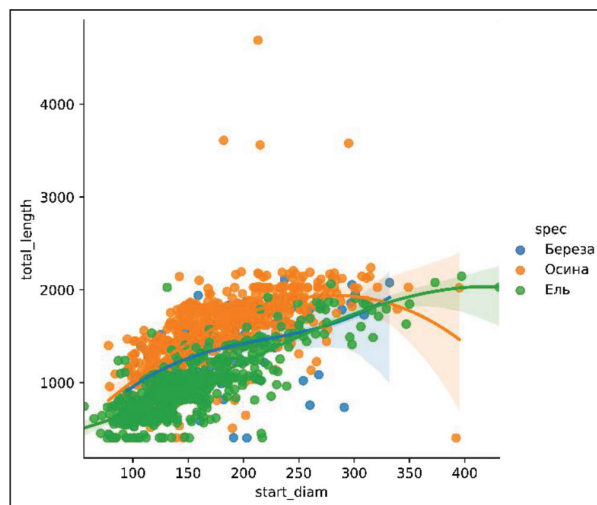


Рис. 7. Зависимость длины ствола от нижнего диаметра. Библиотека seaborn языка программирования Python

Fig. 7. Dependence diagram of the tree length on the lower diameter. The seaborn library of the Python programming language

На рис. 6 и 7 представлены данные, дифференцированные по породам. График для каждой из пород промаркирован различным цветом. Из рис. 6 следует, что есть некоторое отличие в зависимостях для осины и ели. Регрессионная линия для данных по породе «осина» проходит немного выше, чем для породы «ель». Исходя из формул (1) и (2), можно сделать вывод, что при одном и том же значении нижнего диаметра ствола, объем, который получается с одного дерева, будет иметь большее значение у осины, чем у ели. В данных присутствуют некоторые выбросы (ошибки), однако их влияние на общую регрессионную кривую (тренд) за счет их малого количества незначительно.

Рассмотрим данные, для которых построены графики зависимостей (рис. 7). Наиболее выразительно прослеживается зависимость длины ствола от нижнего диаметра для породы «осина». Здесь, в отличие от графика на рис. 6, самое подходящее значение степени регрессии оказалось равным 3, поскольку оно наиболее точно описывает исходные данные. При увеличении степени полинома происходит «переобучение», т. е. линия тренда начинает подстраиваться под исходные данные, и, таким образом, для новых данных применение полученной модели не будет иметь смысла. Оба графика (рис. 6 и 7) строились по значениям нижнего диаметра (диаметра комлевого реза). В данном случае это диаметр, который был зафиксирован бортовой системой ВСРМ при начале обработки ствола дерева.

Однако существует такой параметр, как диаметр ствола на высоте груди. В каждой стране высота замера различна. В РФ она равна 1,3 м. В *stm*-файлах, которые получены по всем стволам за одну рабочую смену, данный параметр находится под отдельным кодом и при этом не всегда записывается в конечные данные. Наиболее целесообразным способом определения диаметра на уровне 1,3 м будет использование кода 273 3 или 273 4, в которых находятся нижний диаметр и его изменения через каждые 0,1 м. Для того чтобы вычислить необходимое значение, требуется из нижнего диаметра вычесть сумму изменений диаметра за первые 13 шагов, поскольку высота 1,3 м кратна величине шага с учетом допущения, что комлевой рез ХГ осуществляется заподлицо с нулевым уровнем (т. е. уровнем лесного настила). На практике, учитывая погрешность натурального отвода, это типичная ситуация, а уровень и погрешность измерений комлевого реза ХГ относительно длины ствола дерева незначительны.

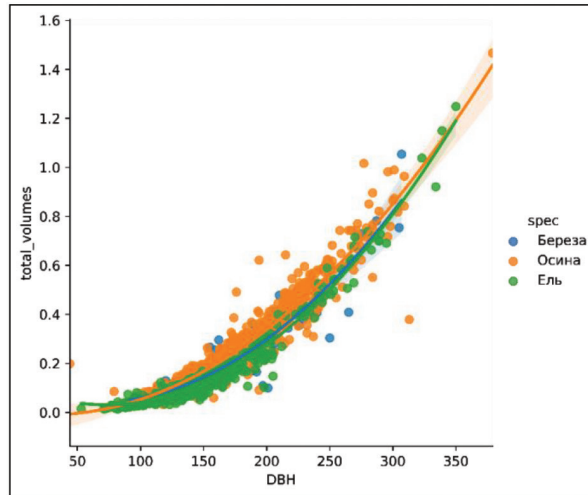
Сравнение зависимости объема ствола дерева от нижнего диаметра для различных пород показало удовлетворительные результаты. Однако стоит рассмотреть зависимость объема ствола от диаметра на высоте груди. В качестве стандартной высоты, на которой замеряется диаметр, принимается 1,3 м. Альтернатива выбора обусловлена тем, что в самой нижней точке изменение диаметра ствола происходит намного быстрее, чем, например, на высоте уровня груди. Таким образом, значения диаметров на высоте 1,3 м будут иметь меньший разброс, а следовательно, и регрессионная кривая будет наиболее полно описывать предлагаемую модель:

$$f(x)_{\text{осина}} = 1,14 \cdot 10^{-5} x^2 - 5,72 \cdot 10^{-4} x - 3,81 \cdot 10^{-3}. \quad (3)$$

На рис. 8. представлены графики зависимости объема ствола дерева от диаметра на высоте 1,3 м.

Рис. 8. Зависимость объема ствола дерева от диаметра на высоте 1,3 м. Библиотека seaborn языка программирования Python

Fig. 8. Dependence diagram of the tree volume on the diameter at the breast height (1.3 m). The seaborn library of the Python programming language

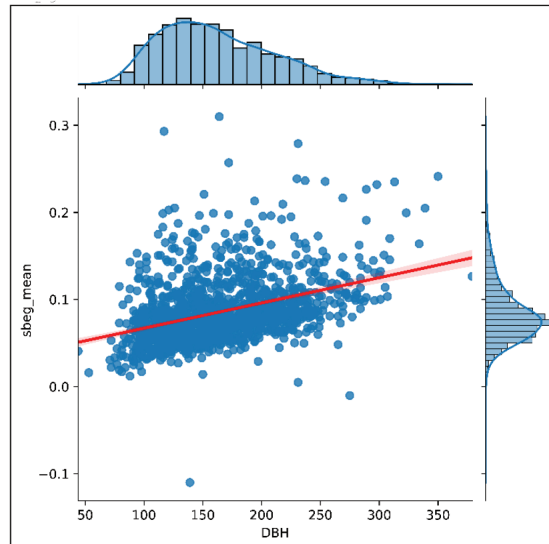


Из рис. 8 следует четкая зависимость объема ствола дерева от диаметра на высоте 1,3 м. По сравнению с графиком на рис. 6 есть существенное улучшение качества регрессионной модели. В данном случае при формировании регрессионной кривой использовалась вторая степень. Этого оказалось достаточно для составления качественной модели. Кроме стандартных графиков сравнения зависимостей, есть и более информативные форматы представления данных.

На рис. 9 представлен график зависимости средней сбежистости ствола от диаметра на уровне груди.

Рис. 9. Зависимость величины среднего сбега от диаметра на высоте груди. Библиотека seaborn языка программирования Python

Fig. 9. Dependence diagram of the average tapering value on the diameter at the breast height (1.3 m). The seaborn library of the Python programming language



На верхней и правой осях графика на рис. 9 отображены распределения исследуемых зависимых величин. Справа показано распределение для оси ординат, а сверху – для оси абсцисс. Такое представление данных улучшает их восприятие и понимание.

Кроме возможности широкого количественного анализа данных, библиотека pandas дает сравнивать зависимости переменных между собой. В рассмотренных выше примерах было показано выявление зависимостей между переменными в графическом виде. Однако для полноты исследования исходных

данных, помимо графического их представления, необходимо получить и их количественную характеристику. В этом случае предлагается вычислить и проанализировать коэффициент корреляции Пирсона, а также оценить статистическую значимость полученных значений.

Для построения корреляционных зависимостей между количественными переменными в библиотеке seaborn используется функция `heatmap`. Результатом работы данной функции станет массив значений, которые попадут в пределы от -1 до 1 . Значение, равное 1 или -1 , будет говорить о полной корреляции между двумя переменными.

На рис. 10 отображена тепловая карта с обозначенными на ней коэффициентами корреляций Пирсона.

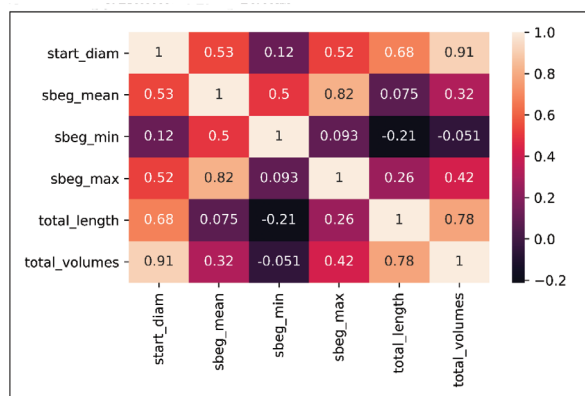


Рис. 10. Отображение значений корреляций Пирсона. Библиотека seaborn языка программирования Python

Fig. 10. Display of Pearson correlation values. The seaborn library of the Python programming language

Чем ближе значение к 1 или -1 , тем больше выражена линейная зависимость между двумя переменными. Анализ полученных данных позволяет сделать выводы о наличии или отсутствии какой-либо зависимости. Слишком малые значения корреляции Пирсона могут указывать на очень слабую взаимосвязь между двумя переменными. Исходя из этого следует оценить не только значение коэффициента корреляции, но и рассчитать уровень значимости, необходимый для установления статистической значимости двух переменных и отклонения нулевой гипотезы о том, что исходные переменные не связаны. В случае подобных расчетов будет применяться библиотека `scipy`, в которой находится функция `pearsonr`. Она использует аппроксимацию, основанную на t -распределении Стьюдента.

На рис. 11 приведена итоговая тепловая карта со значениями, которые оказались статистически значимыми.

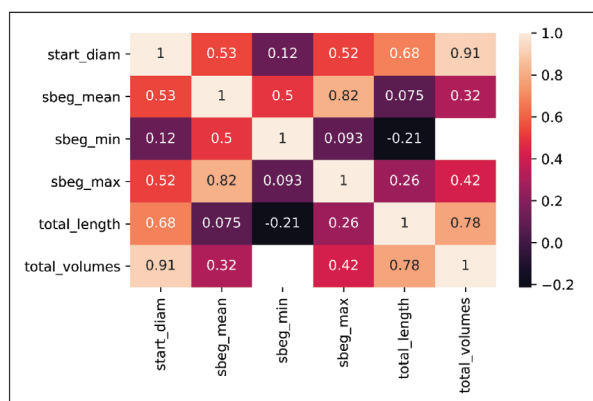


Рис. 11. Отображение статистически значимых значений. Библиотека seaborn языка программирования Python

Fig. 11. Display of statistically significant values. The seaborn library of the Python programming language

Все остальные значения, уровень значимости которых превысил 0,01, были закрашены на тепловой карте белым цветом. Из сопоставления данных рис. 10 и 11 следует вывод о том, что даже низкий коэффициент корреляции может оказаться статистически значимым.

Заключение

Результаты исследований данных файлов ствола .stm, полученные в ходе работы валочно-сучкорезно-раскряжевной машины, позволяют сделать вывод, что применение здесь формата .csv имеет большое преимущество перед .stm, поскольку дает возможность быстрого и эффективного анализа данных, их статистической обработки, графического представления и в конечном итоге помогает принимать решения в условиях риска и неопределенности для корректировки сортиментного плана (АРТ-матриц) и повышения выхода деловой древесины в круглом виде. Используя современные библиотеки (pandas, numpy) и инструменты (Jupyter Notebook) языка программирования Python, можно осуществлять анализ работы операторов валочно-сучкорезно-раскряжевной машины, совершенствовать программное обеспечение этих машин путем установки соответствующих подпрограммных модулей и решателей, прогнозировать производительность техники в кратко- и среднесрочной перспективе, составляя сложные модели по имеющимся данным. Все это поможет повысить общую производительность лесозаготовительного процесса и процент освоения расчетной лесосеки по критерию более полного и оптимального раскроя хлыста. Лицо, принимающее решения, может использовать данные о результатах работы лесной машины непосредственно в общем межплатформенном табличном формате .xls, .xlsx (MS Excel) без использования дополнительного дорогостоящего специализированного межплатформенного программного обеспечения для управления парком лесозаготовительной техники (например, TimberOffice от John Deere), что значительно упрощает работу инженерно-технического персонала лесозаготовительных производств и повышает скорость принятия решений в условиях дефицита информации, риска и неопределенности протекания производственного процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Азаренок В.А., Герц Э.Ф., Мехренцев А.В., Залесов С.В. Сортиментная заготовка древесины. М.: Инфра-М, 2021. 140 с.
Mehrencev A.V., Azarenok V.A., Gerc E.F., Zalesov S.V. *Assorted Wood Harvesting*. Moscow, INFRA-M Publ., 2021. 140 p. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/1141213>
2. Герц Э.Ф. Оценка технологии лесопользования на лесосечных работах: моногр. Екатеринбург: УГЛТУ, 2003. 120 с.
Gerts E.F. *Assessment of Forest Management Technology in Logging Operations: Monograph*. Yekaterinburg, UGLTU Publ., 2003. 120 p. (In Russ.).
3. Дербин В.М., Дербин М.В. Совершенствование сортиментной заготовки древесины // Лесотехн. журн. 2015. Т. 5, № 1(17). С. 128–135.
Derbin V.M., Derbin M.V. Improving Cut-to-Length of Timber. *Forestry Engineering Journal*, 2015, vol. 5, no. 1(17), pp. 128–135. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/11270>
4. Евдокимов Б.П., Кормицкова З.И. Зарубежные лесные машины. Сыктывкар: СЛИ, 2009. 161 с.

Evdokimov B.P., Kormshchikova Z.I. *Foreign Forest Machines*. Syktyvkar, SLI Publ., 2009. 161 p. (In Russ.).

5. Капустина Ю.А., Мехренцев А.В., Ростовская Ю.Н., Стариков Е.Н. Совершенствование информационного обеспечения как фактор устойчивого развития лесного сектора экономики // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы III междунар. науч.-техн. конф. Т. 2 / под ред. В.М. Гедьо. СПб.: СПбГЛТУ, 2018. С. 281–284.

Kapustina Yu.A., Mekhrentsev A.V., Rostovskaya Yu.N., Starikov E.N. Improving Information Support as a Factor in Sustainable Development of the Forest Sector. *Forests of Russia: Politics, Industry, Science and Education. Proceedings of the 3rd International Scientific and Technical Conference*. Vol. 2. Ed. by V.M. Ged'о. Saint Petersburg, SPbFTU Publ., 2018, pp. 281–284. (In Russ.).

6. Мануковский А.Ю., Зорин М.В., Рудов С.Е., Куницкая О.А., Григорьев И.В. Программные комплексы современных лесных машин // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: сб. науч. ст. Казань: Конверт, 2020. С. 57–59.

Manukovskiy A.Yu., Zorin M.V., Rudov S.E., Kunitskaya O.A., Grigorev I.V. Software Complexes of Modern Forest Machines. *Priority Areas of Innovation in Industry: Collection of Academic Papers*. Kazan, Konvert Publ., 2020, pp. 57–59. (In Russ.).

7. Никонорова Л.И., Тимофеев М.Г., Кузнецова А.П. Python как современный язык программирования // Наука и Образование. 2019. Т. 2, № 2. С. 263.

Nikonorova L.I., Timofeev M.G., Kuznetsova A.P. Python as a Modern Programming Language. *Nauka i Obrazovaniye*, 2019, vol. 2, no. 2, art. 263. (In Russ.).

8. Самородницкий А.А., Свойкин В.Ф. К вопросу обработки стволов деревьев харвестером // Февральские чтения: сб. материалов науч.-практ. конф. по итогам науч.-исследоват. работы 2017 г. преподавателей Сыктывкар. лесн. ин-та. Сыктывкар: СЛИ, 2018. С. 167–172.

Samorodnitskiy A.A., Svoikin V.F. To the Issue of Processing Tree Trunks with a Harvester. *February Readings: Proceedings of the Scientific and Practical Conference on the Results of Research Work of Lecturers of the Syktyvkar Forest Institute in 2017*. Syktyvkar, SLI Publ., 2018, pp. 167–172. (In Russ.).

9. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2020666691 РФ. Программа динамического расчета и графического представления выхода готовой продукции из отдельной части ствола stmLogic: № 2020665981: заявл. 04.12.2020: опубл. 14.12.2020 / К.Д. Жук, С.А. Угрюмов, Ф.В. Свойкин.

Zhuk K.D., Ugryumov S.A., Svoikin F.V. *The Program for Dynamic Calculation and Graphical Representation of the Output of Finished Products from a Separate Part of the stmLogic Shaft*. Certificate of Registration of the Computer Program 2020666691 RF, No. 2020665981. 2020. (In Russ.).

10. Свойкин В.Ф., Молчанова А.А. Исследование выхода сортиментов на лесосеке в Республике Коми // Актуал. направления науч. исслед. XXI в.: теория и практика. 2015. Т. 3, № 9-2(20-2). С. 258–262.

Svoikin V.F., Molchanova A.A. The Research Output of Assortments on the Cutting Area in the Republic of Komi. *Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice*, 2015, vol. 3, no. 9-2(20-2), pp. 258–262. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/16481>

11. Свойкин В.Ф., Яковлев Н.Г., Молчанова А.А. Методика оценки выхода сортиментов на лесосеке // Февральские чтения: сб. материалов науч.-практ. конф. проф.-преподават. состава Сыктывкар. лесн. ин-та по итогам науч.-исследоват. работы в 2012 г. Сыктывкар: СЛИ, 2013. С. 258–265.

Svoikin V.F., Yakovlev N.G., Molchanova A.A. Methodology for Assessing the Yield of Assortments at the Logging Site. *February Readings: Proceedings of the Scientific and Practical Conference on the Results of Research Work of Lecturers of the Syktyvkar Forest Institute in 2012*. Syktyvkar, SLI Publ., 2013, pp. 258–265. (In Russ.).

12. Sinitsyna I.V. Exploring Engineering Trends and Technology with Python // Тр. Междунар. науч.-метод. конф. «Информатизация инженерного образования» — ИНФОРИНО-2014. М.: МЭИ, 2014. С. 11–12.

Sinitsyna I.V. Exploring Engineering Trends and Technology with Python. *Proceedings of the International Scientific and Methodological Conference “Informatization of Engineering Education” – INFORINO-2014*. Moscow, MEI Publ., 2014. pp. 11–12.

13. Adebayo A.B., Han H.-S., Johnson L. Productivity and Cost of Cut-to-Length and Whole-Tree Harvesting in a Mixed-Conifer Stand. *Forest Products Journal*, 2007, no. 57, iss. 6, pp. 59–69.

14. Alstott J., Bullmore E., Plenz D. Powerlaw: A Python Package for Analysis of Heavy-Tailed Distributions. *PLoS ONE*, 2014, vol. 9, iss. 1, art. e85777. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0085777>

15. Arlinger J., Möller J. Information Exchange with CTL Machines, Recent Development of StanForD – A Communication Standard. *Proceedings of the 3rd Forest Engineering Conference*. Mont-Tremblant, Canada, 2007.

16. Fleischer M. *Geschichte der Holzernte in Handarbeit*. Proekte Verlag Cornelius GmbH, Halle/S, 2009. 212 p. (In Ger.).

17. Heinimann H.R. Productivity of a Cut-to-Length Harvester Family – An Analysis Based on Operation Data. *Council on Forest Engineering (COFE) Conference Proceedings: “Appalachian Hardwoods: Managing Change”*. Snowshoe, WV, 2001. Available at: https://cofe.org/pdfs/COFE_2001.pdf (accessed 18.07.21).

18. Hesse K. *Components and Systems for Tractor, Stacker and Combine*. Elchingen, Bosch Rexroth Mobile Training, 2003, pp. 18–20.

19. Kemmerer J., Labelle E.R. Using Harvester Data from On-Board Computers: A Review of Key Findings, Opportunities and Challenges. *European Journal of Forest Research*, 2021, vol. 140, pp. 1–17. <https://doi.org/10.1007/s10342-020-01313-4>

20. Linhares M., Sette Júnior C.R., Campos F., Yamaji F.M. Harvester and Forwarder Machines Efficiency and Operational Performance in Forest Harvesting. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 2012, vol. 42, no. 2, pp. 212–219. (In Portuguese). <https://doi.org/10.1590/S1983-40632012000200007>

21. Marchi E., Chung W., Visser R., Abbas D., Nordfjell T., Mederski P.S., McEwan A., Brink M., Laschi A. Sustainable Forest Operations (SFO): A New Paradigm in a Changing World and Climate. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 634, pp. 1385–1397. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.084>

22. Marshall H. *On-Board Machine Stability Information System*. Harvesting Technical Notes. Report No. HTN05-01. Rotorua, NZ, 2013. 5 p.

23. Möller J., Arlinger J., Hannrup B., Larsson W., Barth A. Harvester Data as a Base for Management of Forest Operations and Feedback to Forest Owners. *Proceedings of the 4th Forest Engineering Conference “Innovation in Forest Engineering: Adapting to Structural Change”*. White River, South Africa, 2011.

24. Olivera A., Visser R. Development of Forest-Yield Maps Generated from Global Navigation Satellite System (GNSS)-Enabled Harvester StanForD Files: Preliminary Concepts. *New Zealand Journal of Forestry*, 2016, vol. 46, art. 3. <https://doi.org/10.1186/s40490-016-0059-x>

25. *Operation Manual, Spare Parts Catalog Ponsse Ergo*. Issue 0230197-0390001. Finland, 2012. 2541 p.

26. *Standard for Forest Data and Communications*. Skogforsk, 2007. 10 p. Available at: www.skogforsk.se/contentassets/b063db555a664ff8b515ce121f4a42d1/stanford_maindoc_070327.pdf (accessed 18.07.21).

27. *User Manual. Drive and Control Systems for Combine Harvesters and Forage Harvesters*. RE 98071. Bosch Rexroth AG, 2001. 16 p.


28. *User Manual. Ergo Operation and Maintenance Manual*. Ponsse Oyj, Finland, 2006. 958 p.

29. *User Manual. Operator Book Ponsse Opti 4G.4.705*. Ponsse Oyj, Finland, 2009. 382 p.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

 МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ
И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 621.941

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-5-131-142

Абразивный инструмент из сферокорунда для обработки древесины

А.В. Сергеевичев¹, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID:* [ABC-2274-2020](https://orcid.org/0000-0003-3655-207X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3655-207X>

В.А. Соколова², канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID:* [AAK-6062-2020](https://orcid.org/0000-0001-6880-445X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>

И.И. Костюков¹, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID:* [ABC-3176-2020](https://orcid.org/0000-0002-3629-8190),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3629-8190>

А.Е. Михайлова¹, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID:* [ABC-1987-2020](https://orcid.org/0000-0003-0280-7409),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0280-7409>

С.А. Войнаш³, инж.; *ResearcherID:* [AAK-2987-2020](https://orcid.org/0000-0001-5239-9883),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5239-9883>

¹Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; 910sav@gmail.com, spb.kostyukov@mail.ru, mikhailovaae@ya.ru


²Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Большая Морская, д. 18, Санкт-Петербург, Россия, 191186; sokolova_vika@inbox.ru

³ООО «ПРО ФЕРРУМ», ул. 1-я Красноармейская, д. 1, Санкт-Петербург, Россия, 198005; sergey_voi@mail.ru

Поступила в редакцию 10.09.21 / Одобрена после рецензирования 11.12.21 / Принята к печати 19.12.21

Аннотация. Жесткий абразивный инструмент из сферокорунда эффективен для шлифования древесины и древесных материалов. Использование абразивных кругов из сферокорунда позволяет повысить производительность процесса шлифования древесины, а также расширить область применения жесткого абразивного инструмента за счет снижения засаливания инструмента и ликвидации прижогов обработанной поверхности. Для обоснования рациональных условий применения абразивных кругов из сферокорунда необходимо определить зависимости, связывающие поверхностные геометрические параметры круга, которые непосредственно влияют на резание, с регламентированными рецептурой объемными характеристиками: зернистостью, содержанием абразивного зерна и связки. Они позволяют оценить характер и степень влияния инструментальных факторов на расстояние между режущими элементами рабочей поверхности круга из сферокорунда. Расстояние между абразивными зёрнами на поверхности круга в абсолютном большинстве возможных соотношений объемных характеристик превышает расстояние между стенками абразивного зерна. Наибольшее влияние на поверхностные геометрические параметры оказывает размер абразивных зерен. С его увеличением растут поверхностные геометрические размеры и – очень резко – расстояние между абразивными зёрнами на поверхности круга. Вторым по степени влияния является координата глубины профиля, она во многом определяет соотноше-

© Сергеевичев А.В., Соколова В.А., Костюков И.И., Михайлова А.Е., Войнаш С.А., 2022

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

ние расстояний между зернами и между стенками зерна. Относительное содержание зерен и связки в круге оказывает меньшее влияние на поверхностные характеристики, чем размер зерна и глубина профиля. С их повышением происходит незначительное уменьшение расстояния между зернами на поверхности круга, на расстояние между стенками абразивного зерна они не оказывают влияния. При изготовлении абразивного инструмента регламентируются характеристики внутреннего объемного строения – зернистость, содержание зерна и связки. А при шлифовании непосредственное участие в работе принимает периферийная поверхность круга, его рельеф. Для описания рельефа круга из сферокорунда необходимо установить связь объемных характеристик с его поверхностными геометрическими параметрами, которые необходимы для определения всех основных показателей процесса шлифования.

Ключевые слова: сферокорунд, абразивные круги из сферокорунда, абразивные зерна, межзерновое пространство, поверхностное внутризерновое пространство, шлифование древесины

Для цитирования: Сергеевичев А.В., Соколова В.А., Костюков И.И., Михайлова А.Е., Войнаш С.А. Абразивный инструмент из сферокорунда для обработки древесины // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 5. С. 131–142. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-131-142>

Original article

Abrasive Tools Made of Spherical Corundum in Wood Working

*Alexander V. Sergeevich*¹, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [ABC-2274-2020](https://orcid.org/0000-0003-3655-207X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3655-207X>

*Viktoriiia A. Sokolova*², Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAK-6062-2020](https://orcid.org/0000-0001-6880-445X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>

*Ivan I. Kostyukov*¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [ABC-3176-2020](https://orcid.org/0000-0002-3629-8190), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3629-8190>

*Anna E. Mikhailova*¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [ABC-1987-2020](https://orcid.org/0000-0003-0280-7409), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0280-7409>

Sergey A. Voinash^{3✉}, Engineer; ResearcherID: [AAK-2987-2020](https://orcid.org/0000-0001-5239-9883), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5239-9883>

¹Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; 910sav@gmail.com, spb.kostyukov@mail.ru, mikhailovaae@ya.ru

²Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, ul. Bol'shaya Morskaya, 18, Saint Petersburg, 191186, Russian Federation; sokolova_vika@inbox.ru

³ООО «PRO FERRUM», ul. 1-ya Krasnoarmeyskaya, 1, Saint Petersburg, 198005, Russian Federation; sergey_voi@mail.ru✉

Received on September 10, 2021 / Approved after reviewing on December 11, 2021 / Accepted on December 19, 2021

Abstract. In the manufacture of hard abrasive tools for sanding wood and wood-based materials, spherical corundum is an effective material. The use of spherical corundum abrasive wheels makes it possible to increase the productivity of wood sanding, as well as to expand the application area of hard abrasive tools by reducing tool loading and eliminating burns of the treated surface. In order to substantiate the rational conditions of application of abrasive



wheels made of spherical corundum it is necessary to determine the dependences linking the surface geometric parameters of the wheel, which directly influence the cutting, with the volume characteristics regulated by the formulation: grain size, content of abrasive grain and binder. The dependencies allow us to assess the nature and degree of influence of tool factors on the distance between the cutting elements of the operating surface of the spherical corundum wheel. The distance between abrasive grains on the wheel surface exceeds the distance between the walls of the abrasive grain in the vast majority of possible ratios of volume characteristics. The greatest influence on the surface geometric parameters has the size of abrasive grains. As it increases, the surface geometric dimensions grow, with a very sharp increase in the distance between abrasive grains on the wheel surface. The second most influential is the profile depth coordinate, which largely determines the ratio of distances between grains and between the grain walls. The relative grain and binder content in the wheel has less influence on the surface properties than the grain size and profile depth. The distance between grains on the wheel surface decreases slightly with their increase; they have no effect on the distance between the abrasive grain walls. The characteristics of the internal volumetric structure (grain size, grain content and binder content) are regulated in the production of abrasive tools. The peripheral surface of the wheel (its relief) is directly involved in the sanding process. For describing the relief of a spherical corundum wheel, it is necessary to determine the relationship between the volume characteristics and its surface geometric parameters, which are necessary to determine all the main parameters of the sanding process. **Keywords:** spherical corundum, spherical corundum abrasive wheels, abrasive grains, intragrain space, surface intragrain space, wood sanding

For citation: Sergeevichev A.V., Sokolova V.A., Kostyukov I.I., Mikhailova A.E., Voinash S.A. Abrasive Tools Made of Spherical Corundum in Wood Working. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 5, pp. 131–142. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-131-142>

Введение

В механической технологии древесины большой объем работ приходится на операции шлифования, являющиеся заключительными перед отделкой и склеиванием. От шероховатости шлифованной поверхности зависит протекание данных технологических операций, внешний вид и качество изделий [3, 5, 8, 9]. Автоматизация производства, возросшие требования к внешнему виду обработанной поверхности требуют постоянного совершенствования дерево-режущего инструмента, условий его эксплуатации, улучшения подготовки и снижения стоимости.

В настоящее время на деревообрабатывающих предприятиях четко прослеживается курс на применение шлифования в точный размер, операции фрезерования заменяются абразивным калиброванием. Происходит переход на новые типы мебели с увеличенным количеством деталей из цельной древесины, имеющих сложную форму [1, 3, 4, 8, 9, 11, 18].

Для обеспечения потребности деревообрабатывающих предприятий в современном дерево-режущем инструменте необходимо постоянно совершенствовать жесткий и эластичный абразивный инструмент и разрабатывать новые виды такого инструмента.

В статье приводится анализ общего объема поверхностного свободного пространства для размещения продуктов обработки в абразивных кругах из сферокорунда по сравнению с абразивными кругами из сплошных абра-

живных материалов. На износостойкость и производительность абразивного инструмента достаточно большое влияние оказывает объем его межзернового пространства.

Изучением применения абразивных кругов из сферокорунда при шлифовании древесины и древесных материалов занимались многие отечественные [2, 4, 6, 7, 10, 12, 13, 17] и зарубежные [14–16, 18] ученые. Исследователи процесса шлифования древесины отмечают, что применение абразивных кругов имеет определенные преимущества перед шлифовальной шкуркой: высокая точность обработки, получение требуемого качества обработанной поверхности, высокая стойкость инструмента, его низкая стоимость [2, 4, 6, 10, 11, 15, 16].

Использование абразивных кругов из сферокорунда позволяет повысить производительность процесса шлифования древесины, а также расширить область применения жесткого абразивного инструмента за счет снижения засаливания инструмента и ликвидации прижогов обработанной поверхности [2, 3, 5, 6, 11, 16].

Объекты и методы исследования

Основными характеристиками абразивного инструмента, определяющими его рабочие свойства, являются зернистость, твердость и структура. Для получения различной твердости и структуры необходимо обеспечить определенное количественное соотношение абразивных зерен, связки и пор в единице объема инструмента. Относительное содержание зерен β_g , связки β_b и пор β_p в абразивном инструменте рассчитывается следующим образом:

$$\beta_g = \frac{V_g}{V_k}; \beta_b = \frac{V_c}{V_k}; \beta_p = \frac{V_p}{V_k}; \quad (1)$$

$$\beta_g + \beta_b + \beta_p = 1,$$

где V_g, V_k, V_c, V_p – объемы соответственно зерен, круга, связки, пор, м³.

Но так как абразивное зерно сферокорунда представляет собой сферу, то внутризерновое свободное пространство абразивного материала можно отнести к объему пор в круге. Тогда для абразивных кругов из сферокорунда формулы (1) примут вид

$$\beta_g = \frac{V_g - V_{is}}{V_b}; \beta_b = \frac{V_b}{V_b}; \beta_p = \frac{V_p - V_{is}}{V_b}, \quad (2)$$

где V_{is} – объем внутризернового пространства в круге, м³; V_b – плотность связки, кг/м³.

Общий объем внутризернового пространства в круге находим из объемного отношения внутризернового пространства отдельного зерна основной фракции зернистости V'_{is} к объему зерна V'_g :

$$V_{is} = \frac{V'_{is}}{V'_g} V_g. \quad (3)$$

С учетом выражения (3), формулы (2) примут окончательный вид для расчета относительного содержания абразивного материала, связки и пор в абразивном круге из сферокорунда:

$$\beta_g = \frac{V_g \left(1 - \frac{V'_{is}}{V'_p}\right)}{V_b}; \beta_b = \frac{V_b}{V_b}; \beta_p = \frac{V_p + V_g \frac{V'_{is}}{V'_g}}{V_b}. \quad (4)$$

Объем абразивного материала сферокорунда в круге зависит от процентного содержания, определяемого рецептурой изготовления, и насыпной плотности абразивного зерна ρ_g :

$$V_g = \frac{m_g}{\rho_g} \left(1 - \frac{V'_{is}}{V'_g}\right),$$

где m_g – масса зерна в круге, кг.

Объем связки в абразивном инструменте, изготовленном с применением порообразователя, как в нашем случае для кругов из сферокорунда, будет равен:

$$V_b = \frac{m_b}{\rho_b} - V_0,$$

m_b – масса связки в круге, кг; V_0 – объем порообразователя в круге, м³.

Объем пор в круге определяется из выражения

$$V_p = V_b - V_g - V_b.$$

Результаты расчетов по формулам (4) относительного содержания абразивного материала, связки и пор в зависимости от размеров абразивных зерен сферокорунда представлены на рис. 1. Расчеты производились по рецептуре опытных абразивных кругов.

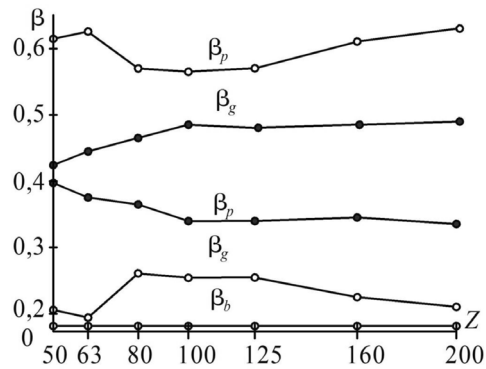


Рис.1. Зависимость относительного содержания зерен, связки и пор в абразивном инструменте от зернистости z ($\rho_b = 700$ кг/м³): —○— для сферокорунда; —●— для сплошного абразивного материала

Fig. 1. Dependence of the relative content of grains, binder and pores in the abrasive tool on the grain size z ($\rho_b = 700$ kg/m³): —○— for spherical corundum; —●— for solid abrasive material

Из полученных теоретических результатов видно, что абразивные круги из сферокорунда по сравнению с кругами из других абразивных материалов, изготовленных по единой технологии и рецептуре, имеют значительно больший объем пор. С увеличением номера зернистости абразивного материала и плотности абразивных кругов отношение объема пор в кругах из сферокорунда к объему пор в кругах из других абразивных материалов увеличивается. С повышением плотности кругов из сферокорунда происходит снижение относительного содержания пор в круге: при изменении плотности с 600 до 800 кг/м³ относительное содержание пор снижается на 16–20 %. С ростом номера зернистости абразива относительное содержание зерен и пор в круге из сферокорунда изменяется по сложной зависимости.

При изготовлении абразивного инструмента регламентируются характеристики внутреннего объемного строения: зернистость, содержание зерна и связки. При шлифовании непосредственное участие в работе принимает периферийная поверхность круга, его рельеф. Для описания рельефа круга из сферокорунда необходимо установить связь объемных характеристик с его поверхностными геометрическими параметрами, которые необходимы для определения всех основных показателей процесса шлифования.

Исходя из того, что абразивные зерна сферокорунда имеют почти совершенно правильную геометрическую форму, внутреннее объемное и поверхностное строение круга из сферокорунда должно описываться моделью, где абразивные зерна представлены в виде сфер. Абразивные зерна обычного абразивного материала чаще всего моделируются в виде шара, реже в виде сплющенного или вытянутого эллипсоидов вращения. В последнем случае основными параметрами, характеризующими абразивные зерна, являются объем и площадь поперечного сечения. Параметры, характеризующие абразивное зерно в форме шара, представлены в таблице.

Параметры абразивного зерна и его вершин
Parameters of abrasive grains and their tops

Характерный размер	Коэффициент объема зерна	Площадь поперечного сечения	Объем зерна	Коэффициент формы вершины зерна	Объем вершины зерна	Коэффициент площади сечения зерна	Площадь сечения вершины	Коэффициент площади сечения вершины	Размер сечения зерна	Коэффициент размера сечения зерна
d	0,523	$0,785d^2$	$0,523d^3$	1,57	$1,57dy^2$	0,785	$1,33y\sqrt{dy}$	1,33	$2dy$	2

Примечание: d – диаметр; y – глубина профиля.

Для абразивного зерна в форме сферы, кроме параметров, указанных в таблице, необходимо учитывать толщину стенки сферы.

Определение поверхностных геометрических параметров абразивных кругов из сферокорунда, влияния на них объемных характеристик производим по методике, изложенной в работах [1, 5, 11]. Расстояние между зернами на поверхности круга δ представляется как функция от диаметра, относительного

содержания зерна и связки, коэффициента формы и ориентации зерен на поверхности круга K_g и глубины профиля:

$$\delta = f(d, \beta_g, \beta_b, K_g, y).$$

Рассмотрим на поверхности круга элемент объема, образованный сечениями двух соседних зерен, разделенных расстоянием δ и разновысотностью H . Этот объем имеет высоту $y > H$ и ширину x , равную размеру зерна в поперечном сечении на глубине y . Начало системы координат совпадает с вершиной наиболее выступающего зерна, а ось OY направлена внутрь круга по нормали к нему. Схема для расчета поверхностных геометрических параметров представлена на рис. 2.

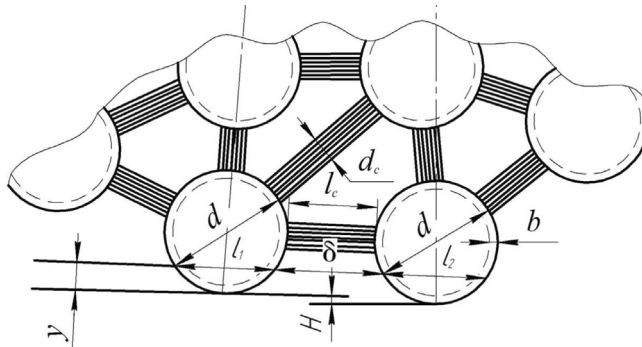


Рис. 2. Схема для определения поверхностных геометрических параметров абразивного круга из сферокорунда: l_1, l_2 – длина мостиков; d_c – толщина связок; l_c – расстояние между двумя точками

Fig. 2. Scheme for determining the surface geometric parameters of an abrasive wheel made of spherical corundum: l_1, l_2 – ligament length; d_c – binder thickness; l_c – distance between two points

Выделенное пространство состоит из трех объемов, два из которых составляют половины отсекаемых частей вершин зерен и определяются по формулам:

$$V_1 = \frac{1}{2} \mu_{is} d y^2;$$

$$V_2 = \frac{1}{2} \mu_{is} d (y - H)^2,$$

где μ_{is} – коэффициент материала.

Для расчета выделенного объема, заключенного между зернами, будем считать, что поверхностные характеристики инструмента полностью определяются его объемными соотношениями, т. е.

$$V_{bs} / V_{bb} = \beta_p / \beta_b = K_p,$$

где V_{bs} – объем поверхностной межзерновой поры, м³; V_{bb} – объем мостика связки, м³; K_p – коэффициент пористости.

Откуда

$$V_{bs} = \beta_p / \beta_b \cdot V_{bb} = K_p V_{bb}. \tag{5}$$

В объемной модели абразивного инструмента связку представляют в виде небольших перемишек – мостиков связки, скрепляющих абразивные зерна. Каждый мостик характеризуется размерами и формой. Объем мостика определяется по формуле

$$V_{bb} = \mu_{bb} l_b d_b^2, \quad (6)$$

где μ_{bb} – коэффициент формы мостика связки; l_b – длина мостика связки, м; d_b – поперечный размер мостика связки, м.

Размеры мостика связки можно найти из выражений:

$$l_b = d \left(\left(\mu_g / \mu'_g \right) \left(1 / \beta_g \right) - 1 \right); \quad (7)$$

$$d_b = d \sqrt{\frac{\beta_b \cdot \mu_g \cdot 1}{\beta_g \mu_b \cdot \mu'_g \cdot \left(\mu_g / \mu'_g \right) \left(1 / \beta_g \right) - 1}}, \quad (8)$$

где μ_g, μ'_g – коэффициенты материала.

Максимальное число мостиков связки на одно зерно

$$\mu_{\max_bb} = 19,5(\beta_g + \beta_b) - 2,5.$$

Необходимо отметить, что при расчете по данным формулам относительное содержание зерен и связки принимается как для кругов из сплошного абразивного материала.

Общий объем выделенного пространства на поверхности круга

$$V_1 + V_2 + V_{bs} = \frac{1}{2} \mu_{is} d \left(y^2 + (y - H)^2 \right) + K_p d^3 \frac{\beta_b}{\beta_g (19,5(\beta_g + \beta_b) - 2,5)} \cdot \frac{\mu_g}{\mu'_g} \mu_{bb}. \quad (9)$$

Данный объем зависит от формы сечения вершины зерна:

$$V = x y \delta = \mu'_{is} \cdot y \sqrt{dy} \cdot \delta, \quad (10)$$

где x – поперечный размер сечения вершины, м; μ'_{is} – коэффициент вершины зерна.

Приравняв различные выражения для объема (9) и (10), получим

$$\delta = \frac{1}{2} \cdot \frac{\mu_{is}}{\mu'_is} \sqrt{dy} \left(1 + \left(1 - \frac{H}{y} \right)^2 \right) + K_p \frac{\beta_b}{\beta_g (19,5(\beta_g + \beta_b) - 2,5)} K_g \frac{d^{2,5}}{y^{1,5}}, \quad (11)$$

где $K_g = \frac{\mu_g}{\mu'_g} \cdot \frac{\mu_{bb}}{\mu_{is}}$.

Абразивные зерна сферокорунда в процессе работы и правки круга разрушаются, происходит обнажение острых режущих стенок абразивного зерна. Если рассматривать процесс шлифования в плоскости торцового сечения круга, то передняя по направлению вращения круга стенка зерна и задняя выступают как самостоятельные режущие элементы, связанные между собой определенными зависимостями. Поэтому для описания рельефа круга из сферокорунда необходимо принимать глубину профиля, сопоставимую с диаметром абразивного зерна. В этом случае y значительно больше H и их отношение $\frac{H}{y}$ в формуле (11) можно приравнять к нулю.

Принимаем, что мостик связки имеет форму прямоугольного параллелепипеда, для которого $\mu_{bb} = 1$, тогда коэффициент формы и ориентации зерен на поверхности круга $K_g = 0,5$. После преобразований и подстановки численных значений коэффициентов, указанных в таблице, формула (11) принимает вид

$$\delta = 1,18\sqrt{dy} + \frac{1 - \beta_b - \beta_g}{\beta_g (19,5(\beta_g + \beta_b) - 2,5)} \cdot 0,5 \frac{d^{2,5}}{y^{1,5}}.$$

Данная формула устанавливает зависимость расстояния между абразивными зёрнами на поверхности круга от всех его характеристик: зернистости, содержания зерна, связки, а также от глубины профиля, т. е. расстояния от поверхности круга, на котором рассматривается указанная зависимость.

Расстояние между стенками абразивного зерна l на определенной глубине профиля будет описываться формулой

$$l = 2\sqrt{(y-b)(d-b-y)},$$

где b – толщина стенки абразивного зерна, м.

Этой зависимостью устанавливается связь расстояния между режущими элементами отдельного зерна на поверхности круга с его размерами и координатой y . Объемные параметры β_g и β_b не оказывают влияния на расстояние между стенками зерна.

Результаты исследования и их обсуждение

Общий объем допустимого заполнения поверхностных впадин продуктами обработки в абразивных кругах из сферокорунда будет состоять из объема свободного поверхностного межзернового пространства и пространства внутризернового. Определение объема свободного межзернового пространства между двумя зёрнами производится по формулам (5)–(8) и зависит от объемных параметров круга. Объем поверхностного внутризернового пространства одного зерна рассчитывается по формуле

$$V_{is} = \mu_g (y-b) \left(\frac{3}{4} l^2 + (y-b)^2 \right).$$

Он полностью определяется геометрическими размерами зерна и координатой глубины профиля.

Теоретические зависимости расстояний между режущими элементами абразивного круга из сферокорунда b и l от диаметра абразивного зерна, относительного содержания связки, зерна и глубины профиля представлены на рис. 3.

На рис. 4 отражена зависимость объемов поверхностного межзернового пространства и поверхностного внутризернового пространства от диаметра зерна. Влияние зернистости на объем внутризернового пространства в круге определено из предположения, что $y = d/2$, т. е. объем равен половине внутрисферического пространства абразивных зерен основной фракции зернистости.

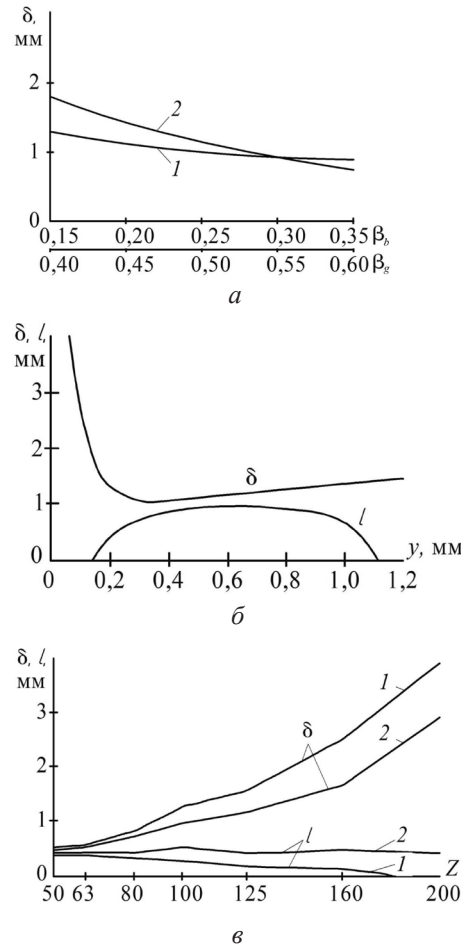


Рис. 3. Зависимость расстояния: a – между зернами δ от относительного содержания связки в круге (1) и относительного содержания зерен в круге (2) ($d = 1,25$ мм; $\beta_g = 0,485$; $y = 0,20$ мм); $б$ – между зернами δ и между стенками l от глубины профиля ($d = 1,25$ мм; $\beta_b = 0,171$; $\beta_g = 0,485$); $в$ – между зернами δ и между стенками абразивного зерна l от зернистости z ($\rho_b = 700$ кг/м³; $\beta_b = 0,171$; $l - y = 0,15$ мм; $2 - y = 0,20$ мм)

Fig. 3. Dependence of the distance: a – between the grains δ on the relative content of the binder in the circle (1) and the relative content of the grains in the wheel (2) ($d = 1.25$ mm; $\beta_g = 0.485$; $y = 0.20$ mm); $б$ – between the grains δ and between the walls l on the profile depth ($d = 1.25$ mm; $\beta_b = 0.171$; $\beta_g = 0.485$); $в$ – between the grains δ and between the walls of an abrasive grain l on the grain size z ($\rho_b = 700$ kg/m³; $\beta_b = 0.171$; $l - y = 0.15$ mm; $2 - y = 0.20$ mm)

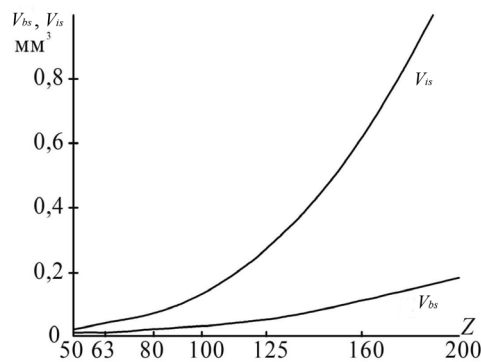


Рис. 4. Зависимость поверхностных объемов межзернового V_{bs} и внутризернового V_{is} пространства от зернистости z ($y = d/2$; $\rho_b = 700$ кг/м³)

Fig. 4. Dependence of the surface intergranular V_{bs} and intragranular V_{is} volumes on the grain size z ($y = d/2$; $\rho_b = 700$ kg/m³)

Заключение

Геометрические поверхностные параметры являются функцией не только объемных характеристик круга, но и координаты глубины профиля, направленной внутрь круга по нормали к нему. Расстояние между стенками абразивного зерна на поверхности круга полностью определяется его размерами и координатой глубины профиля. На расстояние между зернами воздействует, кроме размеров зерна и глубины профиля, содержание в круге зерен и связки.

Общий объем поверхностного свободного пространства для размещения продуктов обработки в абразивных кругах из сферокорунда по сравнению с абразивными кругами из сплошных абразивных материалов, изготовленных по единой технологии и рецептуре, больше на величину поверхностного внутризернового пространства. Внутризерновой объем на рабочей поверхности круга из сферокорунда значительно превышает межзерновой поверхностный объем и интенсивно увеличивается с ростом зернистости абразивного материала, что положительно влияет на износостойкость и производительность абразивного инструмента за счет уменьшения объема застревающей стружки в этих пространствах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Братан С.М. Идентификация параметров съема при комбинированном шлифовании // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: материалы междунар. сб. науч. тр. Донецк: ДонГТУ, 2000. С. 24–32.
Bratan S.M. Identification of Removal Parameters in Combined Grinding. *Advanced Technologies and Systems of Mechanical Engineering. Proceedings of the International Collection of Academic Papers*. Donetsk, DonGTU Publ., 2000, pp. 24–32. (In Russ.).
2. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Колокольников М.Г. Абразивное изнашивание М.: Машиностроение, 1990. 224 с.
Vinogradov V.N., Sorokin G.M., Kolokol'nikov M.G. *Abrasive Wear*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1990. 224 p. (In Russ.).
3. Гдалевич А.И. Финишная обработка лепестковыми кругами. М.: Машиностроение, 1990. 112 с.
Gdalevich A.I. *Finishing Treatment with Flap Wheel*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1990. 112 p. (In Russ.).
4. Гришкевич А.А., Костюк О.И. Увеличение периода эксплуатации шлифовального инструмента при обработке древесины // Вестн. БарГУ. Сер.: Техн. науки. 2015. Вып. 3. С. 17–21.
Grishkevich A.A., Kostyuk O.I. Increasing the Operating Period of Grinding Tool in the Processing of Wood. *BarSU Herald. Series Engineering*, 2015, iss. 3, pp. 17–21. (In Russ.).
5. Калинин Е.П. Теория и практика управления производительностью абразивной обработки с учетом затупления инструмента: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Рыбинск, 2006. 34 с.
Kalinin E.P. *Theory and Practice of Abrasive Processing Productivity Control with Regard to Tool Blunting*: Dr. Eng. Sci. Diss. Abs. Rybinsk, 2006. 34 p. (In Russ.).
6. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. Севастополь: СевНТУ, 2012. 304 с.
Novoselov Yu.I. *Dynamics of Surface Shaping in Abrasive Processing*. Sevastopol, SevNTU Publ., 2012. 304 p. (In Russ.).
7. Переладов А.В., Камкин И.П. Определение режима изнашивания инструмента при шлифовании // Изв. ВолгГТУ. 2015. № 11(173). С. 24–29.
Pereladov A.V., Kamkin I.P. Determination of the Wear Mode of the Tool during Grinding. *Izvestia VSTU*, 2015, no. 11(173), pp. 24–29. (In Russ.).
8. Рыбин Б.М., Кириллов Д.В. Оценка фактического объема полостей неровностей на обработанной поверхности древесины // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2014. № 4. С. 131–137.

Rybin B.M., Kirillov D.V. Assessment of the Actual Volume of Cavities Irregularities on the Processed Surface of Wood. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2014, no. 4, pp. 131–137. (In Russ.).

9. Санев В.И., Каменев Б.Б., Сергеевичев А.В. Резание древесины и древесных материалов. СПб.: Лань, 2018. 456 с.

Sanev V.I., Kamenev B.B., Sergeevichev A.V. *Cutting Wood and Wood Materials*. Saint Petersburg, Lan' Publ., 2018. 456 p. (In Russ.).

10. Сергеевичев А.В. Анализ разрушения абразивных зерен при шлифовании древесины и древесных материалов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2015. № 5. С. 117–125.

Sergeevichev A.V. The Analysis of Destruction of Abrasive Grains during the Grinding of Wood and Wood Materials. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2015, no. 5, pp. 117–125. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2015.5.117>

11. Силин С.С., Леонов Б.Н., Хрульков В.А., Поletaев В.А. Оптимизация технологии глубинного шлифования. М.: Машиностроение, 1989. 120 с.

Silin S.S., Leonov B.N., Khrul'kov V.A., Poletaev V.A. *Optimization of Deep Grinding Technology*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1989. 120 p. (In Russ.).

12. Хватов Б.Н., Зубков Д.В., Родина А.А. Исследование производительности шлифования абразивными лентами с самозатачивающимся зерном // Вестн. ТГТУ. 2012. Т. 18, № 4. С.1031–1037.

Khvatov B.N., Zubkov D.V., Rodina A.A. Research into Grinding Rate of Abrasive Belt with Self-Sharpening Grain. *Transactions of the TSTU*, 2012, vol. 18, no. 4, pp. 1031–1037. (In Russ.).

13. Хромчак И.И. Абразивная обработка плитных материалов на минеральных вяжущих: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Львов, 1990. 20 с.

Khromchak I.I. *Abrasive Processing of Plate Materials on Mineral Binders*: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs. Lviv, 1990. 20 p. (In Russ.).

14. Brinksmeier E., Aurich J.C., Govekar E., Heinzl C., Hoffmeister H.-W., Klocke F., Peters J., Rentsch R., Stephenson D.J., Uhlmann E., Weinert K., Wittmann M. Advances in Modeling and Simulation of Grinding Processes. *CIRP Annals*, 2012, vol. 55, iss. 2, pp. 667–696. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2006.10.003>

15. Cai G.Q., Feng B.F., Jin T., Gong Y.D. Study on the Friction Coefficient in Grinding. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, vol. 129, iss. 1-3, pp. 25–29. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00569-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00569-1)

16. Carrano A.L., Taylor J.B. Geometric Modeling of Engineered Abrasive Processes. *Journal of Manufacturing Processes*, 2005, vol. 7, iss. 1, pp. 17–27. [https://doi.org/10.1016/S1526-6125\(05\)70078-5](https://doi.org/10.1016/S1526-6125(05)70078-5)

17. Sergeevichev A., Kushnerev V., Sergeevichev V., Sokolova V., Onegin V. Analysis of the Influence of Instrumental and Regime Factors on the Quality of Wood Grinding. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1399, iss. 4, art. 044043. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/4/044043>

18. Zhou X., Xi F. Modeling and Predicting Surface Roughness of the Grinding Process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002, vol. 42, iss. 8, pp. 969–977. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00011-1](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00011-1)

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья

УДК 674.8:674.049.2:542.973

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-5-143-156

Послойный динамический модуль сдвига в поперечном сечении древесностружечной плиты

Ю.Г. Скурыдин¹✉, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAE-1212-2019](https://orcid.org/0000-0002-1852-2152),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1852-2152>

Е.М. Скурыдина², канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAB-4572-2021](https://orcid.org/0000-0002-1707-8846),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1707-8846>


¹Алтайский государственный университет, просп. Ленина, д. 61, г. Барнаул, Россия, 656049; skur@rambler.ru✉

²Алтайский государственный педагогический университет, ул. Молодежная, д. 55, г. Барнаул, Россия, 656031; skudem@rambler.ru

Поступила в редакцию 14.10.21 / Одобрена после рецензирования 12.01.22 / Принята к печати 13.01.22

Аннотация. Результаты работы направлены на формирование представлений об особенностях молекулярной подвижности компонентов наружных и внутренних слоев материала древесностружечной плиты в диапазоне температур от комнатной до 275...300 °С, а также на выявление факта недоотверждения связующего во внутренних слоях. Приведены данные о температурных зависимостях динамического модуля сдвига наружных и внутренних слоев материала древесностружечной плиты, полученные методом динамического механического анализа на крутильном маятнике. Обнаружены значительные отличия в характере зависимостей для образцов, взятых на разном удалении от поверхностных слоев. Для материала наружных слоев характерна типичная тенденция непрерывного неравномерно-последовательного уменьшения динамического модуля сдвига с ростом температуры, свойственная большинству полимерных и композитных материалов. Во внутренних слоях при температуре 140±5 °С выявлено кратковременное скачкообразное увеличение динамического модуля сдвига относительно соседних участков, не характерное для материалов, находящихся в стабильном состоянии. Кроме того, имеет место тенденция уменьшения динамического модуля сдвига материала древесностружечной плиты при комнатной температуре с удалением от наружных слоев, обусловленная неоднородным фракционным составом и различиями в характере процессов химической сшивки при горячем прессовании. Высказано предположение, что обнаруженное аномальное увеличение динамического модуля сдвига во внутренних слоях материала при температуре 140±5 °С является признаком протекания процесса доотверждения связующего непосредственно в условиях его нагрева при измерении динамического модуля сдвига методом динамического механического анализа. Сделан вывод, для образца древесностружечной плиты характерно максимальное отверждение термореактивного связующего в слоях, отстоящих от обеих поверхностей до 4,5...5,0 мм. Во внутренних слоях, отстоящих от поверхностей на расстояние более 5,5 мм, происходит частичное недоотверждение связующего. Таким образом, показано, что метод динамического механического анализа может быть использован в качестве инструментального средства контроля за наличием во внутренних слоях материала древесностружечной плиты компонентов термореактивного связующего, недоотвержденных в процессе горячего прессования, что поможет получить материал с более стабильными характеристиками.

© Скурыдин Ю.Г., Скурыдина Е.М., 2022

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

Ключевые слова: древесностружечная плита, динамический механический анализ, динамический модуль сдвига, древесина, термореактивная смола, отверждение связующего, композитный материал

Благодарности: Исследование выполнено в рамках реализации Программы поддержки научно-педагогических работников ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет», проект «Применение методов цифровой обработки для интерпретации экспериментальных данных о структуре и свойствах древесины и древесных композитных материалов».

Для цитирования: Скурыдин Ю.Г., Скурыдина Е.М. Послойный динамический модуль сдвига в поперечном сечении древесностружечной плиты // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 5. С. 143–156. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-143-156>

Original article

Layer-by-Layer Dynamic Shear Modulus in the Cross-Section of a Particle Board

Yuri G. Skurydin¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAE-1212-2019](https://orcid.org/0000-0002-1852-2152), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1852-2152>

Elena M. Skurydina², Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAB-4572-2021](https://orcid.org/0000-0002-1707-8846), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1707-8846>

¹Altai State University, prosp. Lenina, 61, Barnaul, 656049, Russian Federation; skur@rambler.ru

²Altai State Pedagogical University, ul. Molodezhnaya, 55, Barnaul, 656031, Russian Federation; skudem@rambler.ru

Received on October 14, 2021 / Approved after reviewing on January 12, 2022 / Accepted on January 13, 2022

Abstract. The research results are aimed at the formation of ideas concerning the features of molecular motion of the components of the outer and inner layers of the particle board material in the temperature range from room temperature to 275–300 °C, as well as at revealing the fact of binder undercuring in the inner layers. The paper provides data on the temperature dependences of the dynamic shear modulus of the outer and inner layers of the particle board material, obtained by dynamic mechanical analysis using a torsion pendulum. We found significant differences in the nature of the dependencies for samples taken at different distances from the surface layers. The material of the outer layers is characterized by the typical pattern of a continuous irregularly consistent decrease in the dynamic shear modulus with increasing temperature, which is common to most polymeric and composite materials. A short-term intermittent increase in the dynamic shear modulus relative to neighboring areas was detected in the inner layers at 140±5 °C, which is not typical for materials in a stable state. There is also a tendency for the dynamic shear modulus of the particle board material to decrease at room temperature with distance from the outer layers, due to the heterogeneous fractional composition and differences in the nature of chemical cross-linking during hot pressing. It has been assumed that the detected anomalous increase in the dynamic shear modulus in the inner layers of the material at 140±5 °C is a symptom of the binder post-treatment process directly in conditions of its heating when measuring the dynamic shear modulus by dynamic mechanical analysis. Thus, it is concluded that the particle board sample shows maximum curing of the thermosetting binder in the layers, which are 4.5–5.0 mm distant from both



surfaces. Partial undercuring of the binder occurs in the inner layers, which are more than 5.5 mm away from the surfaces. Thus, it is shown that the method of dynamic mechanical analysis can be used as a tool to control the presence in the inner layers of the particle board material of the components of thermosetting binder, undercured in the hot pressing process, which will help to obtain a material with more stable characteristics.

Keywords: particle board, dynamic mechanical analysis, dynamic shear modulus, wood, thermosetting resin, binder curing, composite material

Acknowledgments: The research was carried out within the framework of the Support Program for scientific and pedagogical workers of the Altai State University, the project “Application of Digital Processing Methods for Interpretation of Experimental Data on the Structure and Properties of Wood and Wood Composite Materials”.

For citation: Skurydin Yu.G., Skurydina E.M. Layer-by-Layer Dynamic Shear Modulus in the Cross-Section of a Particle Board. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 5, pp. 143–156. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-143-156>

Введение

До настоящего времени древесина остается одним из важнейших природных материалов, используемых человеком. В число направлений ее применения входит получение конструкционных композитных материалов – древесностружечных плит (ДСТП), в составе которых древесина в предварительно измельченном виде присутствует в качестве наполнителя [4, 6, 10, 17–19, 23]. Технологические процессы в целлюлозно-бумажной и деревообрабатывающей промышленности требуют постоянного контроля качества выпускаемой продукции, соответствия производственных параметров условиям технологических регламентов и стандартов (ГОСТ 10632–2014, ГОСТ 32274–2013, ГОСТ 32399–2013) [2]. Важным этапом контроля является определение механических характеристик материалов, для чего разработаны и применяются множество методик [3]. При этом до настоящего времени использование традиционных методов контроля физико-механических характеристик древесных композитных материалов не всегда позволяет с достаточной степенью достоверности выявить влияние производственных параметров на характер процессов, протекающих при изготовлении материала.

Например, может быть затруднена оценка влияния параметров режимов горячего прессования: температуры, давления, количества и марки используемого связующего, химических и механических добавок и т. п. – на свойства материала и характер межмолекулярного взаимодействия образующих его компонентов. Зачастую применяемые для этого методы являются сложными, требуют использования уникального дорогостоящего лабораторного оборудования, функциональность которого для лабораторий специализированных предприятий зачастую избыточна.

ДСТП представляет собой неоднородный по составу и свойствам композитный материал, образованный измельченным древесным наполнителем и синтетическим связующим. При горячем прессовании древесно-клеевой композиции происходит термическое отверждение связующего, образующего прочную матрицу, обволакивающую древесные частицы и придающую мате-

риалу механическую прочность. Структура внутренних слоев ДСтП отличается от структуры слоев, образующих ее поверхность, что обусловлено требованиями к внешнему виду и качественным характеристикам материала (ГОСТ 10632–2014, ГОСТ 32274–2013, ГОСТ 32399–2013) [2]. Следствием являются значительные различия в механических свойствах слоев ДСтП, в отношении образующих их компонентов, в характере термореактивных процессов, протекающих в плите при прессовании [2, 7]. При этом могут иметь место различия в степени отверждения связующего в материале в зависимости от расположения слоя относительно поверхности плиты. Актуальной является задача поиска методов выявления и анализа таких отличий – в том числе для оптимизации параметров производственного процесса с точки зрения получения материала с требуемыми физико-механическими свойствами при сведении к минимуму затрат на его получение.

Цель исследования – изучение особенностей молекулярной подвижности компонентов наружных и внутренних слоев ДСтП методом динамического механического анализа (ДМА), выявление недоотвержденности связующего во внутренних слоях.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования выбран материал наружных и внутренних слоев ДСтП толщиной 16 мм. ДСтП получена по стандартной технологии (при удельном давлении 1,8...2,2 МПа, температуре 150...180 °С и продолжительности склеивания 3...3,5 мин) на основе технологической щепы древесины хвойных и лиственных пород (ГОСТ 10632–2014, ГОСТ 32274–2013, ГОСТ 32399–2013). В качестве связующего материала использована карбамидоформальдегидная смола марки КФ-МТ. Образцы для исследований изготовлены в виде пластин прямоугольного сечения размером ~ 80×10×1,5...2 мм. Вырезка образцов выполнена из поверхностных и внутренних слоев плиты в соответствии со схемой, показанной на рис. 1. В табл. 1 сопоставлены индексы (А, В, С, D, E, F) каждого из образцов с местом его исходного расположения в ДСтП, расстоянием друг от друга и от наружной поверхности ДСтП.

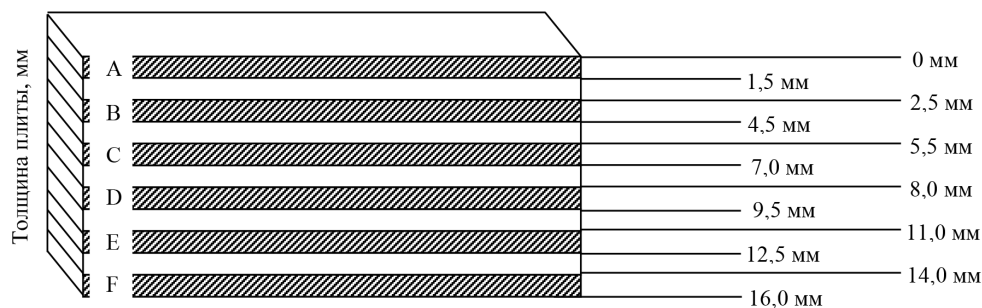


Рис. 1. Схема распределения образцов (А, В, С, D, E, F) по толщине ДСтП

Fig. 1. Schematic distribution of samples (A, B, C, D, E, F) by thickness of particle boards

Таблица 1

Сопоставление толщины образцов с исходным местом их расположения относительно одной из наружных плоскостей ДСтП

Comparison of the thickness of the samples with their original position relative to one of the outer planes of the particle board

Образец	Диапазон распределения толщины образца в зависимости от удаленности относительно наружной плоскости плиты, мм	Расстояние от срединной части образца до наружной плоскости плиты, мм
A	0,0...1,5	0,75
B	2,5...4,5	3,50
C	5,5...7,0	6,25
D	8,0...9,5	8,75
E	11,0...12,5	11,75
F	14,0...16,0	15,00

Предметом исследования стали температурные зависимости динамического модуля сдвига G' образцов ДСтП. Эти зависимости позволяют определить наличие областей температурных переходов, соответствующих резкому изменению характера молекулярной подвижности в тех или иных компонентах материала [13, 22]. Для ДСтП такими компонентами являются лигнин, целлюлоза и гемицеллюлозы древесины, карбамидоформальдегидная смола. Наличие переходных областей может быть обусловлено протекающими в них релаксационными процессами, вызванными размораживанием сегментальной подвижности молекулярных макроцепей (процессы расстекловывания), переходами из одного фазового состояния в другое. Положение переходных областей, их ширина и интенсивность, взаимное расположение зависят от структуры макромолекул, от присутствия в композитном материале примесей, от особенностей межфазного взаимодействия и т. п. [13, 16, 22].

Измерение G' выполнено методом ДМА на обратном крутильном маятнике [9] в соответствии с ГОСТ 20812–83. Возможность применения ДМА для изучения особенностей молекулярной подвижности компонентов древесины и композитных материалов, полученных на ее основе, ранее была показана в серии экспериментов [15, 21]. Диапазон температур, использованных в работе, – от комнатной до 275...300 °С, шаг измерений – 5...10 °С. В каждой точке измерений проведено предварительное термостатирование продолжительностью не менее 10 мин, необходимое для равномерного прогрева всего объема исследуемого образца до заданной температуры измерений. Результатом измерений является дискретно-точечная температурная зависимость G' в заданном диапазоне.

Для повышения точности определения температурных границ и температуры максимума интенсивности переходных областей выполнена цифровая обработка экспериментальных данных. Для этого произведено сглаживание экспериментальных зависимостей $G'(t)$ кубическими сплайнами, в результате которого зависимость приобретает вид непрерывной неравномерно-убывающей плавной кривой, определяющей значения G' во всем исследованном диа-

пазоне (рис. 2). Далее определены первая и вторая температурные производные G' , характерный вид которых (рис. 2) позволяет найти точные границы и температуру максимума интенсивности любой из переходных областей. Максимуму интенсивности того или иного переходного процесса соответствует минимум на температурной зависимости dG'/dt и переход через ноль кривой температурной зависимости d^2G'/dt^2 . Началу переходного процесса соответствует минимум зависимости d^2G'/dt^2 , а его завершению – соседний максимум d^2G'/dt^2 , расположенный правее.

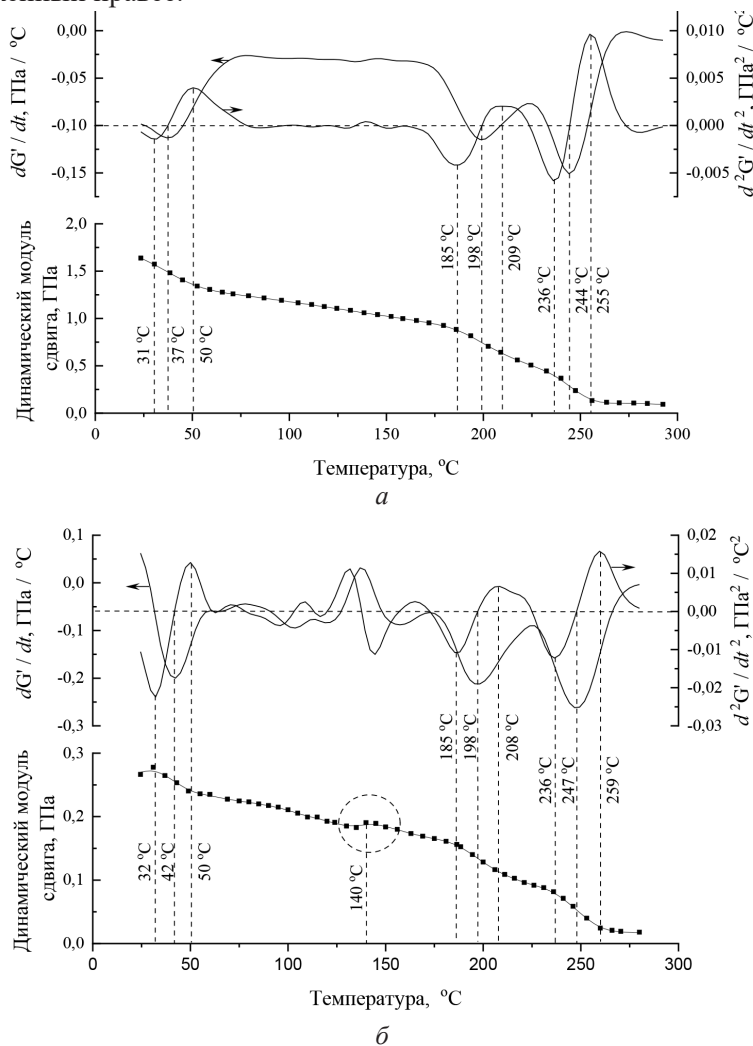


Рис. 2 (начало). Температурные зависимости динамического модуля сдвига G' , первой и второй температурных производных G' для: *a* – наружного слоя ДСтП (образец А); *б* – внутреннего слоя ДСтП (образец D); *в* – внутреннего слоя ДСтП (образец E); *г* – наружного слоя ДСтП (образец F)

Fig. 2 (beginning). Temperature dependences of the dynamic shear modulus G' , first and second temperature derivatives G' : *a* – of the outer layer of the particle board (sample A); *б* – of the inner layer of the particle board (sample D); *в* – of the inner layer of the particle board (sample E); *г* – of the outer layer of the particle board (sample F)

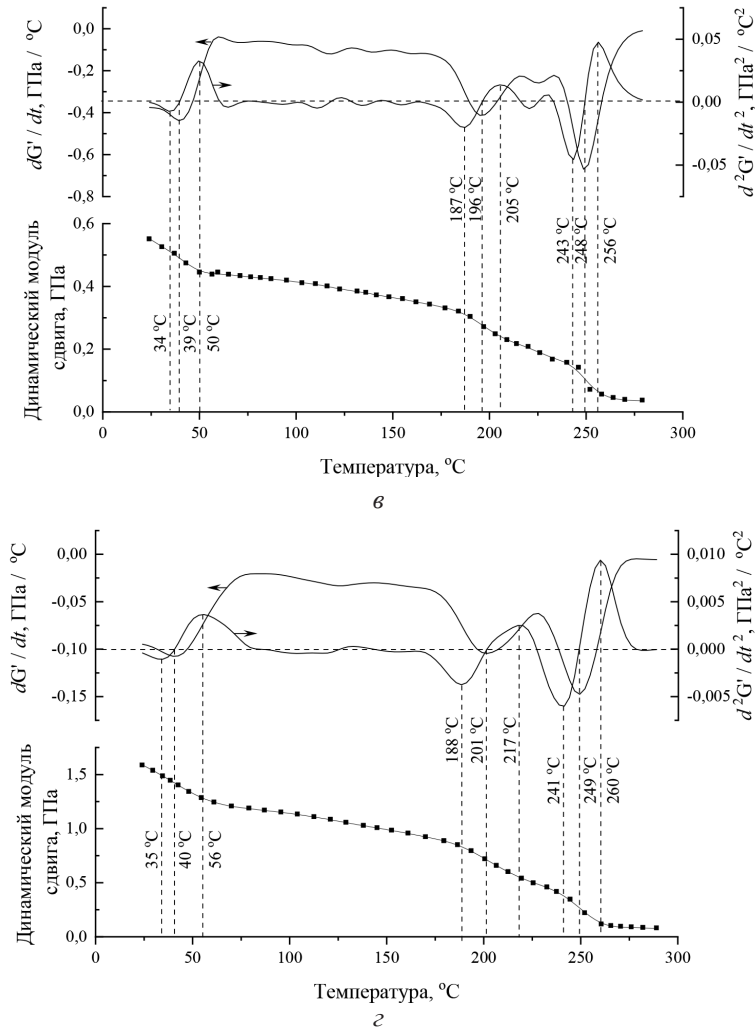


Рис. 2 (окончание). Температурные зависимости динамического модуля сдвига G' , первой и второй температурных производных G' для: *a* – наружного слоя ДСтП (образец А); *б* – внутреннего слоя ДСтП (образец D); *в* – внутреннего слоя ДСтП (образец E); *г* – наружного слоя ДСтП (образец F)

Fig. 2 (ending). Temperature dependences of the dynamic shear modulus G' , first and second temperature derivatives G' : *a* – of the outer layer of the particle board (sample A); *б* – of the inner layer of the particle board (sample D); *в* – of the inner layer of the particle board (sample E); *г* – of the outer layer of the particle board (sample F)

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 2 показаны примеры температурных зависимостей динамического модуля сдвига G' , его первой и второй температурных производных для наружных и внутренних слоев ДСтП. Для всех образцов характерно наличие трех диапазонов наиболее интенсивного изменения G' . Вид температурных зависимостей G' , представленных на рис. 2, *a*, *г*, можно считать близким к виду обычных температурных переходов в древесине разных пород [1, 11, 20, 21].

Переходный процесс в низкотемпературном диапазоне $\sim 30...55$ °C следует считать мультиплетным и связывать с размораживанием локальных подвижностей макромолекул целлюлозы, процессами расстекловывания ее аморфной составляющей, а также с расстекловыванием части гемицеллюлоз и лигнина, пластифицированных водой [5]. Отмечаются некоторые флуктуации в положении характеристических точек данной переходной области от образца к образцу. Следует предполагать, что это является следствием методических ограничений при проведении эксперимента. Температура начала измерений G' оказывается выше температуры начала данного релаксационного процесса – весь диапазон переходной области не охватывается диапазоном измерений.

Вторая переходная область расположена в диапазоне $\sim 185...210$ °C. На первый взгляд, она идентична переходному процессу, обнаруженному в древесине разных пород [1, 15, 20, 21], и обусловлена расстекловыванием непластифицированной части древесных гемицеллюлоз и лигнина. Однако для всех исследованных образцов ДСтП характерно наличие несимметричной формы кривых температурных зависимостей первой и второй температурных производных G' , хорошо видимое в пределах данного диапазона (рис. 2). Это позволяет говорить о наложении в нем как минимум двух релаксационных процессов. Наиболее вероятно, что один из них действительно обусловлен процессами расстекловывания компонентов древесины. Второй, менее заметный, незначительно смещен в более высокотемпературную область. Его следует связывать с процессом расстекловывания полностью отвержденной части связующего ДСтП. В пользу такой версии свидетельствует расположение данного перехода вблизи температуры, соответствующей максимальной температуре прессования ДСтП [14].

Третья переходная область, расположенная в диапазоне $\sim 235...260$ °C, близка для всех образцов ДСтП и практически идентична переходной области в древесине, обусловленной плавлением кристаллитов древесной целлюлозы [1, 12].

Малые изменения от образца к образцу интенсивности и положения на температурной шкале переходных областей в ДСтП, соответствующих релаксационным и фазовым процессам в древесном наполнителе, указывают на неизменность молекулярного строения древесины в условиях технологического процесса получения ДСтП. Исходное молекулярное строение сохраняется независимо от слоя материала, образующего структуру ДСтП. Имеющиеся незначительные расхождения в положении характеристических точек переходных областей в ДСтП по сравнению с различными древесными породами [11, 15, 17, 20, 21] следует считать результатом использования при подготовке древесной массы смеси древесных частиц неконтролируемого породного состава.

Обратим внимание на область скачкообразного увеличения G' в образце внутреннего слоя ДСтП при температуре 140 °C (рис. 2, б). Увеличение G' с ростом температуры в целом не характерно для полимерных и композитных материалов, так как в стабильных структурах подобного рода изменения температуры неизбежно сопровождаются уменьшением жесткости системы из-за повышения подвижности кинетических элементов в образующих их компонентах [11, 12, 15]. Увеличение G' может быть вызвано техническим

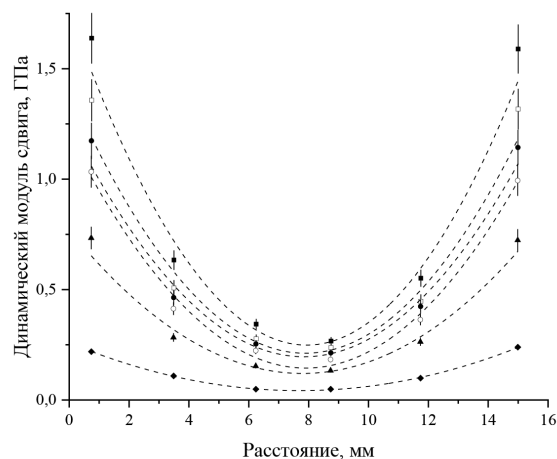
сбоем непосредственно во время проведения измерений, ошибками в ходе обработки результатов либо внутренними процессами в композитном материале, обусловленными химическими реакциями при нагреве, сопровождающем измерения методом ДМА.

Принимая во внимание, что подобная аномалия выявлена при неоднократных повторных измерениях, влияние методических ошибок исключается. Наиболее вероятной причиной кратковременного увеличения G' во внутренних слоях следует считать доотверждение связующего непосредственно в процессе измерений после нагрева образца до соответствующей температуры. Подобного скачка не наблюдается для образцов ДСтП, взятых из поверхностных слоев и слоев, располагающихся на удалении менее 5 мм от них (рис. 2, а, в, г). Следует предполагать, что в процессе горячего прессования исследованных образцов ДСтП в производственных условиях во внутренних слоях плиты полного отверждения связующего не произошло. Следовательно, часть связующего остается недоотвержденной и в готовом материале.

На рис. 3 и 4 показаны сравнительные срезы значений G' при разных температурах для разных слоев ДСтП. С удалением от поверхности материала наблюдается значительное уменьшение G' , что свидетельствует о снижении интенсивности межмолекулярного взаимодействия в его внутренних слоях. Уменьшение G' во внутренних слоях может быть обусловлено двумя причинами. Во-первых, дисперсной неоднородностью материала из-за технологических особенностей производства, при которых наружные слои формируются преимущественно на основе мелкодисперсных древесных частиц с целью придания плите облагороженного внешнего вида [7]. Использование мелкодисперсного наполнителя делает структуру поверхностных и приповерхностных слоев более плотной, воздушные пустоты приобретают меньший размер, связующее в этих слоях распределено более равномерно. Жесткость такой системы выше за счет большего по сравнению с внутренними слоями количества сшитых структур.

Рис. 3. Относительная зависимость G' слоев ДСтП от температуры: 24 (■), 50 (□), 100 (●), 150 (○), 200 (▲) и 250 (◆) °C

Fig. 3. Relative dependence of G' of the particle board layers on the following temperatures, °C: 24 (■), 50 (□), 100 (●), 150 (○), 200 (▲) and 250 (◆)



Во-вторых, может оказывать влияние и описанная выше неполная полимеризация связующего, присущая именно внутренним слоям. Для исследованного образца ДСтП характерны параболические формы зависимостей G' от места расположения соответствующего слоя независимо от температуры (пунктирные линии на рис. 3). G' для образцов, взятых из симметричных слоев

относительно средней части плиты, отличаются незначительно. Это свидетельствует о практически одинаковом составе древесно-полимерной массы и одинаковых условиях ее термообработки с обеих сторон плиты.

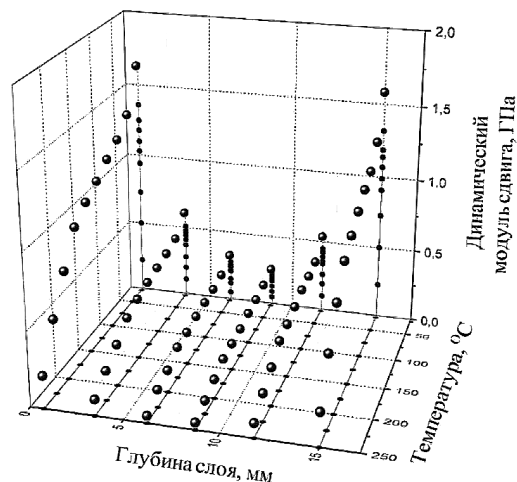


Рис. 4. Температурные зависимости G' и их распределение по слоям ДСтП
Fig. 4. Temperature dependences of G' and their distribution over the particle board layer

С увеличением температуры наблюдается уменьшение разницы между G' в поверхностных, приповерхностных и внутренних слоях. Если при комнатной температуре между поверхностными и внутренними слоями она составляет ~5,3 раза, то при температуре 100 °С снижается до ~5,0 раза, а при 250 °С – до ~4,5 раз. Сводные данные о значениях G' для образцов из разных слоев ДСтП и относительной разнице между G' в поверхностных и внутренних слоях для разных температур показаны в табл. 2.

Таблица 2

Распределение значений G' в разных слоях ДСтП в зависимости от температуры
Distribution of the G' values in different particle board layers depending on temperature

Слой	G' , ГПа, при температуре, °С									
	24	50	75	100	125	150	175	200	225	250
A	1,64	1,36	1,25	1,18	1,10	1,03	0,94	0,73	0,50	0,22
B	0,62	0,51	0,48	0,46	0,44	0,41	0,37	0,28	0,20	0,11
C	0,34	0,28	0,26	0,25	0,24	0,22	0,21	0,15	0,12	0,05
D	0,27	0,24	0,22	0,21	0,19	0,18	0,17	0,13	0,09	0,05
E	0,55	0,45	0,43	0,42	0,39	0,36	0,34	0,26	0,19	0,10
F	1,59	1,32	1,19	1,14	1,07	0,99	0,91	0,73	0,50	0,23
$(G'_A + G'_F) / (G'_B + G'_E)$	2,76	2,79	2,68	2,64	2,61	2,62	2,61	2,70	2,56	2,14
$(G'_A + G'_F) / (G'_C + G'_D)$	5,30	5,15	5,08	5,04	5,05	5,05	4,87	5,21	4,76	4,50

Рассмотрим динамику относительного изменения средних значений G' поверхностных и внутренних слоев ДСтП с увеличением температуры (табл. 2, рис. 5). Особенностью является тенденция к незначительному, но стабильному уменьшению отношений $(G'_A + G'_F) / (G'_B + G'_E)$ и $(G'_A + G'_F) / (G'_C + G'_D)$ с увеличением температуры вплоть до 150...175 °С (рис. 5). При более высокой температуре (~200 °С) проявляется кратковременное состояние выраженной нестабильности. Для отношения G' поверхностных (A, F) и приповерхностных

(В, Е) слоев (рис. 5, а) при 200 °С характерно незначительное увеличение, а затем интенсивное уменьшение вплоть до достижения предельных значений температуры. Отношение G' поверхностных (А, F) и внутренних (С, D) слоев при температуре 175 °С снижается более интенсивно, однако при 200 °С резко возрастает, после чего снова интенсивно уменьшается (рис. 5, б).

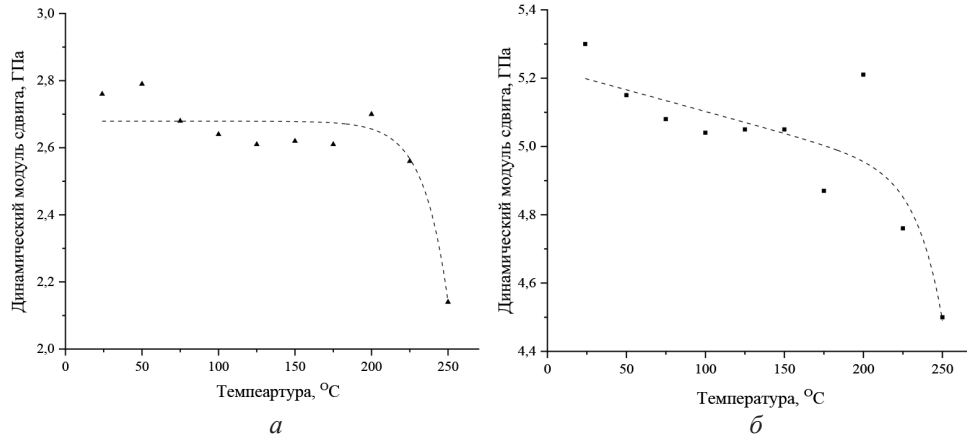


Рис. 5. Температурные зависимости отношения средних значений G' слоев ДСтП: а – отношение для поверхностных и приповерхностных слоев $(G'_A + G'_F) / (G'_B + G'_E)$; б – отношение для поверхностных и внутренних слоев $(G'_A + G'_F) / (G'_C + G'_D)$

Fig. 5. Temperature dependences of the ratio of the average G' values of the particleboard layers: а – ratio for surface and near-surface layers $(G'_A + G'_F) / (G'_B + G'_E)$; б – ratio for surface and inner layers $(G'_A + G'_F) / (G'_C + G'_D)$

Причину кратковременного увеличения отношения модулей сдвига наружных и внутренних слоев при температуре, близкой к 200 °С, следует связывать с отмеченным выше процессом доотверждения связующего во внутренних слоях, который протекает при температуре более 150 °С (рис. 2, б). Структура внутренних слоев при этом кратковременно становится менее стабильной и однородной из-за динамично протекающих конденсационных процессов. Меньшая выраженность увеличения отношения G' поверхностных и приповерхностных слоев при температуре 200 °С и в целом более однозначный характер зависимости (рис. 5, а) могут объясняться меньшей долей недоотвержденных компонентов связующего в этих слоях по сравнению с внутренними слоями.

Принимая во внимание прямую корреляцию G' с прочностными и гидрофобными свойствами композитных материалов [12], следует обратить внимание на необходимость контроля структуры внутренних слоев ДСтП. Недоотверждение связующего может стать причиной существенного снижения физико-механических показателей материала. Ведь даже при полном отверждении связующего внутренние слои из-за технологических особенностей производства ДСтП являются наименее прочной и водостойкой ее частью. Поэтому контроль за степенью отверждения должен быть важной составляющей технологического процесса древесных композитных материалов. Применение таких физических методов, как ДМА, в подобных случаях может стать удобным и надежным инструментом [8].

Заключение

Результаты выполненных исследований позволяют сделать следующие выводы. Метод динамического механического анализа может быть использован для оценки молекулярного строения компонентов наружных и внутренних слоев древесностружечной плиты в диапазоне температур $\sim 20 \dots 300$ °С. По изменению температурных зависимостей динамического модуля сдвига определено положение температурных переходов в компонентах материала. Наблюдаются значительные отличия в характере изменения динамического модуля сдвига наружных, промежуточных и срединных слоев древесностружечных плит с увеличением температуры. Выявлена тенденция уменьшения динамического модуля сдвига при переходе от поверхностных к внутренним слоям материала, обусловленная как различиями в их составе и морфологических показателях, так и характером процессов, протекающих при горячем прессовании.

Во внутренних слоях материала, расположенных на расстоянии более 5,5 мм от его наружной плоскости, при температуре 140 ± 5 °С происходит нехарактерное для полимерных и композитных материалов увеличение динамического модуля сдвига по сравнению с его предшествующей величиной. Высказано предположение, что причиной обнаруженного увеличения является наличие недоотвержденных компонентов связующего во внутренних слоях древесностружечной плиты, обусловленное незавершенностью процесса отверждения при ее горячем прессовании в производственных условиях.

Для более полного отверждения связующего по всей толщине плиты и получения более однородного по свойствам материала рекомендуется увеличение продолжительности процесса прессования с организацией периодического лабораторного контроля за полнотой отверждения с использованием физических методов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Беушева О.С., Скурыдина Е.М., Чемерис М.М., Мусько Н.П., Скурыдин Ю.Г. Влияние условий прессования на свойства плитных материалов, изготовленных из гидротермически обработанной древесины лиственницы // Изв. вузов. Строительство. 2006. № 5(569). С. 48–50.

Beusheva O.S., Skurydina E.M., Chemeris M.M., Musko N.P., Skurydin Yu.G. The Influence of Pressing Condition on Properties of Plate Materials Made of Hydrothermally Treated Larch Wood. *News of higher educational institutions. Construction*, 2006, no. 5(569), pp. 48–50. (In Russ.).

2. Васильев В.В., Хоссейни С.З. Современные требования к древесным плитам для отделки // Древесные плиты: теория и практика: XX Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. А.А. Леоновича. СПб.: Политехн. ун-т, 2017. С. 62–71.

Vasiliev V.V., Hosseini S.Z. Modern Requirements for Wood-Based Panels for Finishing. *Wood-Based Panels: Theory and Practice. Proceedings of the XX International Scientific and Practical Conference*. Ed. by A.A. Leonovich. Saint Petersburg, Polytechnic University Publ., 2017, pp. 62–71. (In Russ.).

3. Волкова С.Н., Сивак Е.Е., Панкратьева О.В., Леванов Г.В., Боев Н.В., Конопченко О.А. Контроль качества строительных материалов из отходов лесной промышленности // Регион. вестн. 2021. № 3(59). С. 33–36.

Volkova S.N., Sivak E.E., Pankrat'yeva O.V., Levanov G.V., Boyev N.V., Konotopchenko O.A. Quality Control of Building Materials from Forest Industry Waste. *Regional'nyy vestnik*, 2021, no. 3(59), pp. 33–36. (In Russ.).

4. Древесные плиты: теория и практика: XX Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. А.А. Леоновича. СПб.: Политехн. ун-т, 2017. 122 с.

Wood-Based Panels: Theory and Practice. Proceedings of the XX International Scientific and Practical Conference. Ed. by A.A. Leonovich. Saint Petersburg, SPbSTU Publ., 2017. 122 p. (In Russ.).

5. Ерыхов Б.П. Неразрушающие методы исследования целлюлозно-бумажных и древесных материалов. М.: Лесн. пром-сть, 1987. 228 с.

Erykhov B.P. *Non-Destructive Methods of Examination of Pulp and Paper and Wood-Based Materials*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1987. 228 p. (In Russ.).

6. Кархова С.А. Анализ состояния производства и торговли листовыми древесными материалами в мире // *Baikal Research Journal*. 2018. Т. 9, № 2.

Karkhova S.A. State Analysis for Production and Trade of Boards and Plywood in the World. *Baikal Research Journal*, 2018, vol. 9, no. 2, art. 6. (In Russ.). [https://doi.org/10.17150/2411-6262.2017.9\(2\).6](https://doi.org/10.17150/2411-6262.2017.9(2).6)

7. Отлев И.А. Интенсификация производства древесностружечных плит. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 192 с.

Otlev I.A. *Intensification of Particle Board Production*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1989. 192 p. (In Russ.).

8. Патент 2619359 С1 РФ, МПК G01N 25/00 (2006.01). Способ определения незавершенности процесса отверждения термореактивного связующего древесностружечной плиты: № 2016102862: заявл. 28.01.2016; опубл. 15.05.2017 / Ю.Г. Скурыдин, Е.М. Скурыдина.

Skurydin Yu.G., Skurygina E.M. *Method of Determination of the Noncompletion of the Process of the Thermoreactive Binder Curing of a Particle Board*. Patent RF, no. RU 2 619 359 C1, 2017. (In Russ.).

9. Перепечко И.И. Акустические методы исследования полимеров. М.: Химия, 1973. 295 с.

Perepchko I.I. *Acoustic Research Methods for Studying Polymers*. Moscow, Khimiya Publ., 1973. 295 p. (In Russ.).

10. Сафин Р.Г., Степанов В.В., Хайруллина Э.Р., Гайнуллина А.А., Степанова Т.О. Современные строительные композиционные материалы на основе древесных отходов // *Вестн. Казан. технол. ун-та*. 2014. Т. 17, № 20. С. 123–128.

Safin R.G., Stepanov V.V., Khairullina E.R., Gainullina A.A., Stepanova T.O. Modern Construction Composite Materials Based on Wood Waste. *Bulletin of the Technological University*, 2014, vol. 17, no. 20, pp. 123–128. (In Russ.).

11. Скурыдин Ю.Г. Строение и свойства композиционных материалов, полученных из отходов древесины после взрывного гидролиза: дис. ... канд. техн. наук. Барнаул, 2000. 147 с.

Skurydin Yu.G. *Structure and Properties of Composite Materials Obtained from Wood Wastes after Explosive Hydrolysis*: Cand. Eng. Sci. Diss. Barnaul, 2000. 147 p. (In Russ.).

12. Скурыдина Е.М. Разработка технологии композиционных материалов на основе древесины и полимерных наполнителей: дис. ... канд. техн. наук. Барнаул, 2006. 170 с.

Skuridina E.M. *Development of the Technology of Composite Materials Based on Wood and Polymer Fillers*: Cand. Eng. Sci. Diss. Barnaul, 2006. 170 p. (In Russ.).

13. Старцев О.В., Салин Б.Н., Скурыдин Ю.Г. Баротермический гидролиз древесины в присутствии минеральных кислот // *Докл. АН*. 2000. Т. 370, № 5. С. 638–641.

Startsev O.V., Salin B.N., Skurydin Yu.G. Barothermal Hydrolysis of Wood in Presence of Mineral Acids. *Doklady Akademii Nauk*, 2000, vol. 370, no. 5, pp. 638–641. (In Russ.).

14. Чубинский А.Н., Варанкина Г.С., Русаков Д.С. Технология древесных плит. СПб.: СПбГЛТУ, 2019. 37 с.

Chubinsky A.N., Varankina G.S., Rusakov D.S. *Technology of Wood-Based Panels*. Saint Petersburg, SPbFTU Publ., 2019. 37 p. (In Russ.).

15. Шахзадян Э.А., Квачев Ю.П., Панков В.С. Температурные переходы в древесине и ее компонентах // Высокомолекулярные соединения. 1992. Т. (А) 34, № 9. С. 3–14.

Shakhzadyan E.A., Kvachev Yu.P., Papkov V.S. Temperature Transitions in Wood and Its Components. *Polymer Science. Series A*, 1992, vol. 34, no. 9, pp. 3–14. (In Russ.).

16. Fengel D., Wegener G. *Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions*. Berlin, De Gruyter, 1983. 613 p. <https://doi.org/10.1515/9783110839654>

17. Müller U., Pretschuh C., Mitter R., Knappe S. Dielectric Analysis as a Cure Monitoring System for UF Particle Boards. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2016, vol. 73, pp. 45–50. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.07.016>

18. Oktay S., Kızılcan N., Bengü B. Oxidized Cornstarch – Urea Wood Adhesive for Interior Particleboard Production. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2021, vol. 110, art. 102947. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2021.102947>

19. Singh N., Rana A., Badhotiya G.K. Raw Material Particle Terminologies for Development of Engineered Wood. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 46, part 10, pp. 11243–11246. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.616>

20. Skurydin Yu.G., Skuridina E.M. Physical and Mechanical Characteristics of the Thermal-Wood Composition from Hydrolyzed Birch Wood. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 316, art. 012066. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/316/1/012066>


21. Skurydin Yu.G., Skurydina E.M. Digital Differential Spectrometry in the Assessment of the Structural Characteristics of Wood and Wooden Composite Materials. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 806, art. 012030. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/806/1/012030>

22. Startsev O.V., Salin B.N., Skuridin Y.G., Utemesov R.M., Nasonov A.D. Physical Properties and Molecular Mobility of the New Wood Composite Plastic “Thermobalite”. *Wood Science and Technology*, 1999, vol. 33, iss. 1, pp. 73–83. <https://doi.org/10.1007/s002260050100>

23. Uemura Silva V., Nascimento M.F., Resende Oliveira P., Panzera T.H., Rezende M.O., Silva D.A.L., Borges de Moura Aquino V., Rocco Lahr F.A., Christoforo A.L. Circular vs. Linear Economy of Building Materials: A Case Study for Particleboards Made of Recycled Wood and Biopolymer vs. Conventional Particleboards. *Construction and Building Materials*, 2021, vol. 285, art. 122906. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122906>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article



ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ
ДРЕВЕСИНЫ И ПРОИЗВОДСТВО ДРЕВЕСНО-
ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Научная статья

УДК 676.038:676.017.44

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-5-157-172

**Структурно-морфологические свойства
вторичного волокна из влагопрочного сырья при мягком размоле.
Часть 1. Характеристика волокон**

А.А. Пенкин¹, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID: GUS-7006-2022,*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5773-6797>

Я.В. Казаков², д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID: J-4634-2012,*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8505-5841>

¹Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова, д. 13 а, Минск, Республика Беларусь, 220006; penkin@belstu.by

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; j.kazakov@narfu.ru

Поступила в редакцию 10.12.21 / Одобрена после рецензирования 03.02.22 / Принята к печати 06.02.22

Аннотация. Рациональное использование бумагообразующего потенциала вторичного волокна за счет максимального сохранения исходной длины и других его структурно-морфологических характеристик при использовании мягких режимов размола является одним из основных принципов подготовки макулатурной массы. Изменение структурно-морфологических свойств вторичного волокна при мягком размоле у влагопрочной макулатуры связано с ее особенностями, которые обусловлены продолжительной тепловой и реагентно-щелочной обработкой сырья в процессе роспуска. Цель работы – исследование структурно-морфологических свойств вторичного волокна, полученного из влагопрочного сырья при мягком размоле. Анализ свойств вторичного волокна выполнен по 2 взаимодополняющим направлениям – характеристика собственно вторичных волокон (1-я часть работы) и характеристика частиц волокнистой мелочи (2-я часть). Установлено, что вторичные волокна до и после размола в целом имеют близкую форму распределения по длине к первичным волокнам беленой сульфатной хвойной целлюлозы, средняя длина которых после первого цикла использования уменьшается незначительно. Рубки вторичных волокон в соответствии с рассчитанными коэффициентами укорочения волокон практически не происходит, а повышение степени помола волокнистой массы связано преимущественно с процессами внешнего и внутреннего фибриллирования. Отмечается, что бережное механическое воздействие при размоле волокнистой массы не сопровождается увеличением ширины вторичных волокон и снижением коэффициента их вытянутости по длине и по массе, значения которого соответствуют полуфабрикатам с высоким бумагообразующим потенциалом (66,3...66,5 и 83,6...84,3). Показано, что мягкий размол волокнистой массы, полученной в условиях ускоренного роспуска влагопрочной макулатуры с приме-

нением персульфата натрия и моноперсульфата калия, приводит к определенному распрямлению волокон – это проявляется в увеличении их среднего фактора формы. Ускоренный роспуск обеспечивает в среднем 60 %, а мягкий размол в среднем 40 % от общего эффекта повышения фактора формы вторичных волокон за счет использования комбинации таких условий массоподготовки.

Ключевые слова: сульфатная хвойная беленая целлюлоза, влагопрочная макулатура, роспуск макулатурной массы, вторичное волокно, мягкий размол, структурно-морфологические свойства

Для цитирования: Пенкин А.А., Казаков Я.В. Структурно-морфологические свойства вторичного волокна из влагопрочного сырья при мягком размоле. Часть 1. Характеристика волокон // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 5. С. 157–172. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-157-172>

Original article

Changes in the Morphological Characteristics of Secondary Fiber Obtained from Wet-Strength Paper during Gentle Refining of Recycled Pulp. Part 1. Fiber Characteristics

Anton A. Penkin^{1✉}, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [GUS-7006-2022](https://orcid.org/0000-0001-5773-6797),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5773-6797>

Yakov V. Kazakov², Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [J-4634-2012](https://orcid.org/0000-0001-8505-5841),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8505-5841>

¹Belarusian State Technological University, ul. Sverdlova, 13 a, Minsk, 220006, Republic of Belarus; penkin@belstu.by[✉]

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberzhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; j.kazakov@narfu.ru

Received on December 10, 2021 / Approved after reviewing on February 3, 2022 / Accepted on February 6, 2022

Abstract. The efficient use of papermaking potential of secondary fiber by gentle refining of recycled pulp is one of the basic principles for the recovered paper stock preparation. The use of mild refining modes for recycled fiber is more important in the case of wet-strength paper than for conventional waste paper. This is due to the fact that recycled fiber is weakened by hard conditions of wet-strength paper repulping, in particular, long repulping time, elevated temperature, the use of alkali and oxidizers. The study aims at evaluating the changes in the morphological characteristics of secondary fiber during gentle low-consistency refining of recycled pulp. The analysis of the secondary fiber morphological characteristics was carried out in two complementary directions, i.e. the analysis of the fibers (part 1) and the analysis of the fines (part 2). Recycled pulp (RP) was obtained from commercial wet-strength tissue paper consisting of 100 % bleached softwood kraft pulp (BSKP) made of pine (*Pinus sylvestris* L.). The wet-strength paper repulping was performed at 60 °C in three ways, namely, repulping with sodium hydroxide (indicated as RP(NaOH)), repulping with sodium hydroxide and sodium persulfate (RP(NaOH + Na₂S₂O₈)), and finally repulping with sodium hydroxide and potassium monopersulfate (RP(NaOH + KHSO₅)). Secondary fibers as well as primary fibers of BSKP had similar length distribution before and after gentle refining. Mean fiber length after first recycle reduced by 5–6 %. The calculated values of the fiber-shortening index showed that fiber cutting practically does not occur during gentle refining



of the recycled pulps. The increase in the refining degree of the pulps is mainly explained by the fibrillation of secondary fibers, rather than the formation of a large amount of fines. Secondary fibers obtained from the wet-strength paper have a high slenderness ratio $((L/W)_l$, from 66.3 to 66.5 and $(L/W)_w$, from 83.6 to 84.3; where L – length, W – width) corresponding to pulp with good papermaking potential. The results showed that low-consistency gentle refining of the recycled pulp obtained by accelerated persulfate and monopersulfate repulping of the wet-strength paper leads to fiber straightening. The overall increase in the shape factor of secondary fibers was achieved due to a combination of accelerated repulping of the wet-strength waste paper (by ~ 60 %) and gentle refining of the pulp (by ~ 40 %).

Keywords: bleached softwood kraft pulp, wet-strength paper, repulping, secondary fiber, gentle refining, morphological characteristics

For citation: Penkin A.A., Kazakov Ya.V. Changes in the Morphological Characteristics of Secondary Fiber Obtained from Wet-Strength Paper during Gentle Refining of Recycled Pulp. Part 1. Fiber Characteristics. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 5, pp. 157–172. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-157-172>

Введение

Структурно-морфологические свойства растительных волокон, являющихся основным компонентом разнообразных видов бумаги и картона, играют исключительно важную роль в формировании требуемого комплекса технических свойств получаемой картоно-бумажной продукции [1, 22]. При этом структурно-морфологические свойства определяются видом используемого волокна (древесное или недревесное, из хвойных или лиственных пород, полученное химическим способом или механическим, с отбелкой или без отбелки и т. д.) и в некоторой степени могут быть целенаправленно скорректированы в процессе массоподготовки, в частности на стадии размола волокнистой массы [10, 16, 23].

Возврат и многократное использование в бумагоделательном цикле растительных волокон также является важным фактором, приводящим к существенному, но мало управляемому изменению их структурных и размерных характеристик: уменьшению средней длины волокон, увеличению доли мелочи и полидисперсности волокон, появлению локальных деформаций волокон [15, 20, 33]. Степень влияния рециклинга на структурно-морфологические свойства получаемого вторичного волокна во многом зависит от особенностей реализации стадий роспуска макулатуры и размола волокнистой массы. Основные параметры данных процессов, такие как продолжительность, температура, концентрация, рН массы, вид и расход вспомогательных химикатов при роспуске, интенсивность и величина механических нагрузок, во время размола обычно подбираются с учетом вида и свойств перерабатываемого вторичного волокнистого сырья [7, 19].

Влагопрочная макулатура в этом отношении имеет ряд специфических особенностей, обусловленных ее повышенной механической прочностью во влажном состоянии. Прочность при растяжении для обычных марок макулатуры снижается при увлажнении материала на 86...98 %, тогда как для влагопрочной макулатуры – только на 60...80 % [3]. Высокую остаточную прочность влагопрочной макулатуры – функциональное свойство исходной бумаги – обеспечивают использованием в процессе производства последней различных влагопроч-

ных добавок: меламино- и карбамидоформальдегидных смол, полиаминов, полиэтилениминов, глиоксилированных полиакриламидов, диальдегид крахмала и пр. [8, 9]. Но наиболее широкое распространение в производстве влагопрочной бумаги получили полиамидамин эпихлоргидриновые смолы (РАЕ-смолы), имеющие наилучший баланс стоимости и технической эффективности, способные отверждаться в нейтральной и слабощелочной средах [26, 28, 31]. Развитие влагопрочности бумаги в случае использования РАЕ-смол объясняется одновременно 2 принципиальными механизмами: защитным и упрочняющим [12]. Защитный механизм заключается в экранировании межволоконных контактов в структуре бумаги нерастворимыми в воде сшитыми структурами полимера, которые формируются в результате гомополиконденсации смолы, находящейся на поверхности и в приповерхностном слое волокон [12, 28]. Упрочняющий механизм реализуется при гетерополиконденсации смолы: при сушке бумаги образуются устойчивые к действию воды ковалентные связи между азетидиновыми группами смолы и карбоксильными группами гемицеллюлоз, обычно присутствующих в большей или меньшей степени в технической целлюлозе [12, 25, 28]. Химические процессы гетерополиконденсации смолы дополняются реакциями гомополиконденсации [12, 28].

Высокая гидролитическая устойчивость образованных сшитых полиамидамин эпихлоргидриновых структур предопределяет особые условия роспуска влагопрочной макулатуры: существенно большую продолжительность, повышенную температуру и щелочность бумажной массы, применение веществ, вызывающих окислительную деструкцию отвержденного полимера [2, 8, 17]. В настоящее время одним из общепринятых принципов подготовки макулатурной массы является максимальное сохранение бумагообразующего потенциала вторичного волокна за счет использования мягких режимов размола массы [4, 11, 18]. Для вторичного волокна, получаемого в результате длительного роспуска влагопрочной макулатуры в достаточно жестких условиях обработки (тепловой, щелочной, реагентной), бережный размол является еще более актуальным, чем для волокна из обычных марок макулатуры. Влиянию размола на структурно-морфологические свойства вторичного волокна из невлагопрочной макулатуры посвящен ряд научных работ [7, 11, 18], в то время как изменения структурно-морфологических свойств волокна из влагопрочной макулатуры в процессе мягкого размола остаются все еще недостаточно изучены.

Цель работы – исследование структурно-морфологических свойств вторичного волокна, полученного из влагопрочного сырья при мягком размоле.

Объекты и методы исследования

Объектом исследований являлось вторичное волокно, полученное из макулатуры в виде влагопрочной тисью на основе беленой сульфатной целлюлозы из древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Предметом – структурно-морфологические свойства вторичных волокон. В качестве добавки для придания влагопрочности бумаге в процессе ее производства использована влагопрочная РАЕ-смола марки Maresin VHP 200.

Свойства использованной влагопрочной макулатуры представлены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства влагопрочной макулатуры (машинное направление)

Wet-strength paper properties

Показатель	Состояние	
	сухое	влажное
Разрушающее усилие, Н	34,7	7,4
Влагопрочность, %	21,3	
Сопротивление разрыву, кН/м	0,694	0,147
Разрывная длина, м	2780	590
Поглощение энергии при разрыве, Дж/м ²	36,24	5,15
Степень крепирования, %	9,2	–
Масса 1 м ² , г	25,4	–
Толщина, мкм	75,4	–

Роспуск влагопрочной макулатуры проведен в лабораторном гидроразбивателе. С целью интенсификации процесса роспуска использованы 2 вида активаторов роспуска, не приводящих к образованию токсичных хлорсодержащих органических веществ [13, 32], – пероксодисульфат натрия $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ (персульфат натрия) и моноперсульфат калия KHSO_5 в виде активного компонента тройной соли $2\text{KHSO}_5 \cdot \text{KHSO}_4 \cdot \text{K}_2\text{SO}_4$. Оба вида добавок вызывают окислительную деструкцию отвержденной влагопрочной РАЕ-смолы, находящейся в структуре бумаги, однако имеют различный механизм действия. Окисление влагопрочной смолы в присутствии персульфата натрия наиболее вероятно проходит по свободнорадикальному механизму [13, 32], тогда как окисление влагопрочной смолы моноперсульфатом калия протекает преимущественно без участия свободных радикалов [32]. Расход активаторов роспуска составил 2,00 % от а. с. макулатуры. В качестве контрольного варианта рассмотрен роспуск влагопрочной макулатуры при температуре 60 °С в присутствии щелочи NaOH с расходом 0,75 % от а. с. бумаги. Аналогичные температурно-щелочные условия использованы при роспуске влагопрочной макулатуры с активаторами роспуска. Продолжительность роспуска влагопрочной макулатуры определялась скоростью ее разволокнения и была следующей: при использовании NaOH – 120 мин, NaOH и $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ – 60 мин, NaOH и KHSO_5 – 40 мин. После первичного роспуска влагопрочной макулатуры в гидроразбивателе осуществлен дороспуск волокнистой массы в лабораторной дисковой мельнице НДМ-3 с разведенными дисками в течение 10 мин.

Для мягкого размол волокнистой массы также применена лабораторная дисковая мельница НДМ-3, трехмерная модель которой показана на рис. 1. Размол волокнистой массы осуществлен при концентрации 4 %.

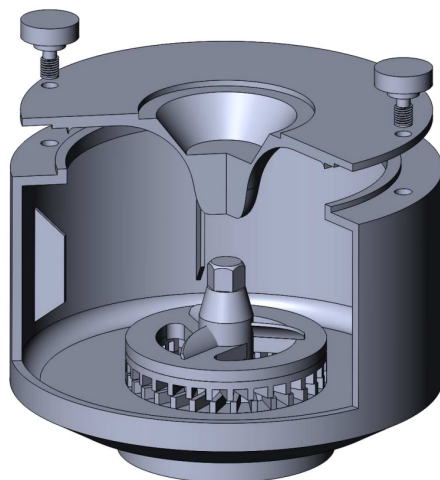


Рис. 1. Трехмерная модель лабораторной мельницы НДМ-3

Fig. 1. 3D model of the laboratory refiner used for gentle refining of recycled pulp

Конструкция изображенной на рис. 1 лабораторной мельницы не относится к числу наиболее распространенных, как, например, лабораторная мельница PFI [21, 27]. В то же время использованная нами мельница по принципу действия очень близка к оборудованию, применяемому для мягкой механической обработки вторичных волокон без их существенного укорочения, в частности к гомогенизатору iFiber, данные о высокой эффективности которого опубликованы в 2021 г. [11]. При правильно подобранных параметрах зоны механической обработки, в первую очередь расстоянии между статорным и роторным дисками, мельница НДМ-3 способна обеспечивать очень бережное механическое воздействие, подобное обеспечиваемому гомогенизатором iFiber или другим размалывающим оборудованием фибриллирующего типа.

С целью достижения мягкого режима размола с максимальным сохранением исходной длины волокон экспериментально подобраны следующие параметры работы дисковой мельницы: величина зазора между статорным и роторным диском – 0,5 мм, частота вращения роторного диска мельницы – 1500...2000 мин⁻¹. Оценку характера размола и соответствующий подбор параметров работы мельницы проводили предварительными исследованиями с помощью расчета коэффициента укорочения волокон [5]:

$$k = \frac{\ln\left(\frac{L_{\text{исх}}}{L_{\text{кон}}}\right)}{\text{СП}_{\text{кон}} - \text{СП}_{\text{исх}}},$$

где $L_{\text{исх}}$ и $L_{\text{кон}}$ – средняя длина волокон до и после размола соответственно, мм; $\text{СП}_{\text{исх}}$ и $\text{СП}_{\text{кон}}$ – степень помола волокнистой массы до (24 °ШР) и после размола (36 °ШР) соответственно.

Для размола волокнистой массы на дисковых мельницах в мягком режиме коэффициент укорочения волокон не должен превышать $9,2 \cdot 10^{-3} (\text{°ШР})^{-1}$ [5]. При перечисленных выше параметрах работы дисковой мельницы фактические значения коэффициента укорочения волокон были менее $9,2 \cdot 10^{-3} (\text{°ШР})^{-1}$ [5], что позволяет характеризовать использованный в ходе исследований режим размола как мягкий.

Структурно-морфологические свойства вторичного волокна исследованы на оптическом анализаторе L&W Fiber Tester, с помощью которого можно выполнять расширенную количественную оценку в автоматическом режиме, а также экспортировать первичные исходные данные с целью дальнейших расчетов и анализа [1]. Первичные данные (Raw Data) – это массив информации о 3 структурно-геометрических параметрах волокон: фактических длине, ширине и факторе формы. На основании этих данных был определен 4-й структурно-геометрический параметр – коэффициент формы, или коэффициент вытянутости волокон [6, 14, 24], представляющий собой отношение длины волокон к их ширине. Коэффициент вытянутости является важным показателем, характеризующим бумагообразующий потенциал волокон [6, 14].

Исходные данные разбивали на 10 классов по длине, мм: 0,2...0,5; 0,5...1,0; 1,0...1,5; 1,5...2,0; 2,0...2,5; 2,5...3,0; 3,0...3,5; 3,5...4,0; 4,0...5,0; 5,0...7,5. В каждом классе находили соответствующие средние значения длины l_i , ширины w_i , фактора формы (прямоизны) s_i и коэффициента вытянутости l_i/w_i . С учетом количества волокон в каждом классе рассчитывали средние арифметические и средневзвешенные по длине и массе значения длины L_n , L_l , L_w , ширины W_n , W_l , W_w , фактора формы S_n , S_l , S_w и коэффициента формы $(L/W)_n$, $(L/W)_l$, $(L/W)_w$.

Полидисперсность волокон по длине и массе находили соответственно как отношение L_l/L_n и L_w/L_n [29]. Для расчета коэффициента укорочения волокон при размолу использовали 3 вида длины L_n , L_l , L_w , получая соответственно значения коэффициентов k_{L_n} , k_{L_l} , k_{L_w} .

Для построения диаграмм распределения волокон по длине долю по длине определяли как процентное отношение суммарной длины волокон в i -м классе к общей длине волокон во всех классах ($i = 1...10$), долю по числу волокон – как процентное отношение суммарного количества волокон в i -м классе к общему количеству волокон во всех классах.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 2 представлены диаграммы распределения по длине вторичных волокон, полученных при роспуске влагопрочной макулатуры в различных условиях, а также размолотой сульфатной хвойной беленой целлюлозы (СФАХБЦ) – сырья для производства тиссю, являющейся источником влагопрочной макулатуры.

Как видно из рис. 2, вторичные волокна в целом имеют близкую форму распределения по длине к первичным волокнам независимо от использованных методов их получения из влагопрочного сырья. В то же время в классах малой и средней длины (0,2...0,5; 0,5...1,0; 1,0...1,5; 1,5...2,0) доля вторичных волокон, как по длине, так и по числу, существенно выше, а в классах большой длины (2,5...3,0; 3,0...3,5; 3,5...4,0; 4,0...5,0) ниже доли первичных волокон хвойной целлюлозы. С увеличением степени помола в результате мягкого размолу волокнистой массы характер распределения первичных и вторичных волокон по длине остается практически неизменным.

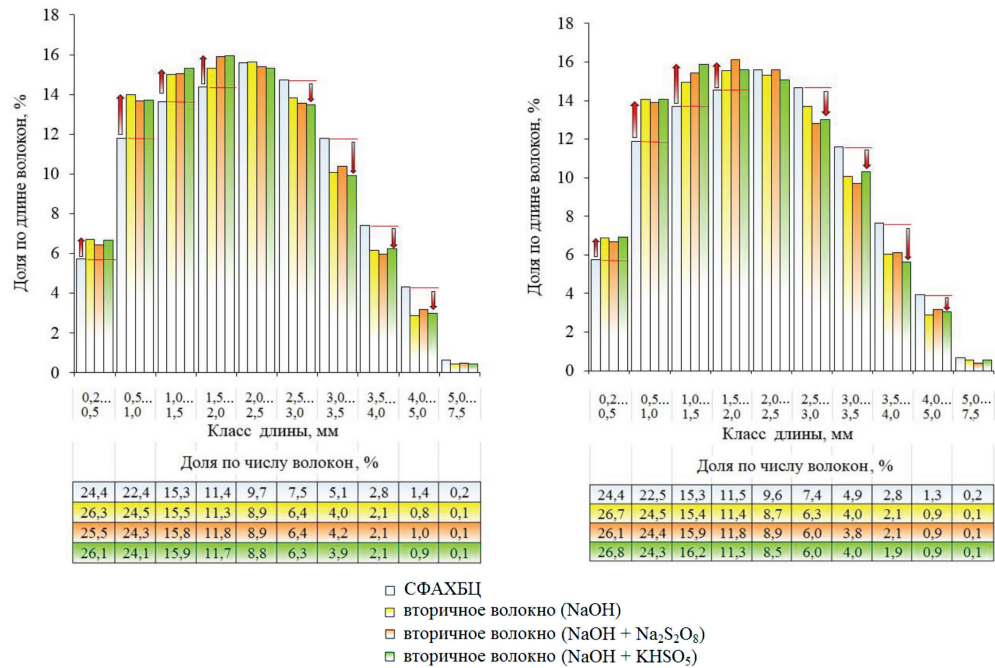


Рис. 2. Распределение вторичных и первичных волокон по длине в процессе их мягкого размола: *a* – до размола; *б* – после размола

Fig. 2. Fiber length distribution (L&W Fiber Tester): *a* – before gentle refining of the pulps, 24 °SR; *б* – after gentle refining of the pulps, 36 °SR

На рис. 3–5 показаны зависимости соответственно ширины, коэффициента вытянутости и фактора формы от средней длины волокон в классах до и после мягкого размола волокнистой массы при степени помола 24 °ШР (⊖) и 36 ° ШР (⊕) соответственно.

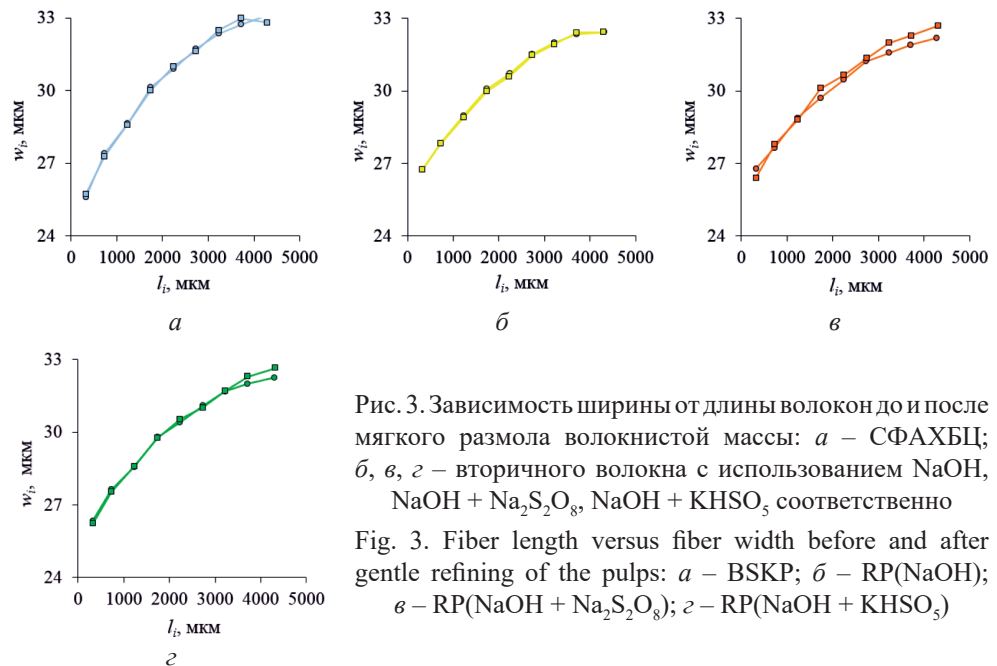


Рис. 3. Зависимость ширины от длины волокон до и после мягкого размола волокнистой массы: *a* – СФАХБЦ; *б*, *в*, *г* – вторичного волокна с использованием NaOH, NaOH + Na₂S₂O₈, NaOH + KHSO₃ соответственно

Fig. 3. Fiber length versus fiber width before and after gentle refining of the pulps: *a* – BSKP; *б* – RP(NaOH); *в* – RP(NaOH + Na₂S₂O₈); *г* – RP(NaOH + KHSO₃)

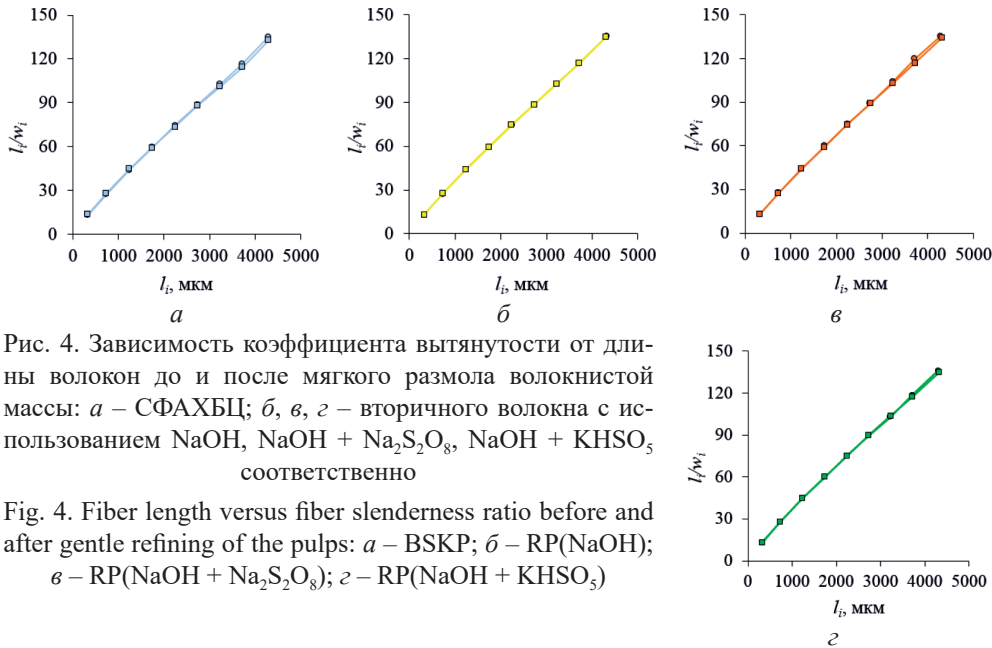


Рис. 4. Зависимость коэффициента вытянутости от длины волокон до и после мягкого размола волокнистой массы: *a* – СФАХБЦ; *б*, *в*, *г* – вторичного волокна с использованием NaOH, NaOH + Na₂S₂O₈, NaOH + KHSO₅ соответственно

Fig. 4. Fiber length versus fiber slenderness ratio before and after gentle refining of the pulps: *a* – BSKP; *б* – RP(NaOH); *в* – RP(NaOH + Na₂S₂O₈); *г* – RP(NaOH + KHSO₅)

Из рис. 3 и 4 видно, что вторичные волокна из влагопрочного сырья демонстрируют зависимости ширины и коэффициента вытянутости от средней длины волокон в классе, аналогичные зависимостям первичных волокон СФАХБЦ. Бережное механическое воздействие при мягком размоле волокнистой массы, как показывает близость кривых до и после размола, не сопровождается дополнительным увеличением ширины вторичных волокон в результате механического сдавливания и снижением коэффициента их вытянутости.

Размол волокнистой массы в мягком режиме способствует повышению фактора формы волокон практически при всех значениях средней длины в классе (рис. 5), что свидетельствует о некотором распрямлении волокон.

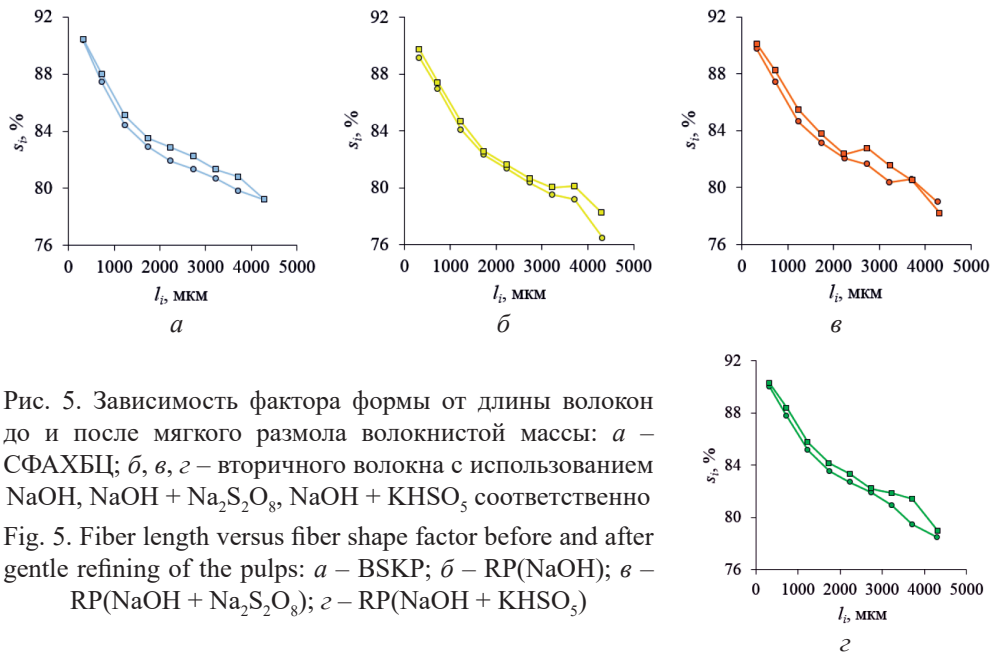


Рис. 5. Зависимость фактора формы от длины волокон до и после мягкого размола волокнистой массы: *a* – СФАХБЦ; *б*, *в*, *г* – вторичного волокна с использованием NaOH, NaOH + Na₂S₂O₈, NaOH + KHSO₅ соответственно

Fig. 5. Fiber length versus fiber shape factor before and after gentle refining of the pulps: *a* – BSKP; *б* – RP(NaOH); *в* – RP(NaOH + Na₂S₂O₈); *г* – RP(NaOH + KHSO₅)

Это явление, известное для первичных волокон [16], в полной мере характерно и для вторичных волокон (рис. 5), полученных в условиях ускоренного роспуска влагопрочной макулатуры с применением персульфата натрия и моноперсульфата калия в щелочной среде. Для вторичных волокон, полученных в условиях более продолжительного роспуска влагопрочной макулатуры (при использовании только добавок щелочи), увеличение фактора формы выражено незначительно.

В табл. 2 приведены усредненные структурно-морфологические параметры первичных и вторичных волокон до и после размола.

Таблица 2

Структурно-морфологические параметры волокон
Morphological characteristics of primary (BSKP) and secondary fibers

Показатель	Вид обработки							
	СФАХБЦ		NaOH		NaOH + + Na ₂ S ₂ O ₈		NaOH + + KHSO ₅	
	Степень помола, °ШР							
	24	36	24	36	24	36	24	36
Средняя длина, мм:								
L_n	1,387	1,380	1,276	1,269	1,293	1,274	1,282	1,260
L_l	2,153	2,142	2,006	2,000	2,016	1,996	2,005	1,988
L_w	2,715	2,704	2,579	2,578	2,581	2,572	2,575	2,573
Полидисперсность:								
по длине (L_l/L_n)	1,55	1,55	1,57	1,58	1,56	1,57	1,56	1,59
по массе (L_w/L_n)	1,96	1,96	2,02	2,03	2,00	2,02	2,01	2,04
Коэффициент укорочения волокон при размолу, °ШР ⁻¹ :								
k_{Ln}	$0,42 \cdot 10^{-3}$		$0,46 \cdot 10^{-3}$		$1,23 \cdot 10^{-3}$		$1,44 \cdot 10^{-3}$	
k_{Ll}	$0,43 \cdot 10^{-3}$		$0,25 \cdot 10^{-3}$		$0,83 \cdot 10^{-3}$		$0,29 \cdot 10^{-3}$	
k_{Lw}	$0,34 \cdot 10^{-3}$		$0,03 \cdot 10^{-3}$		$0,29 \cdot 10^{-3}$		$0,06 \cdot 10^{-3}$	
Средняя ширина, мкм:								
W_n	28,6	28,6	28,8	28,7	28,6	28,6	28,4	28,4
W_l	30,3	30,3	30,1	30,0	29,8	30,0	29,7	29,7
W_w	31,3	31,3	31,0	30,9	30,6	30,9	30,6	30,7
Средний коэффициент вытянутости:								
$(L/W)_n$	47,3	47,1	43,9	43,7	44,8	43,9	44,5	43,9
$(L/W)_l$	70,5	70,0	66,5	66,4	67,5	66,3	67,1	66,5
$(L/W)_w$	87,0	86,4	83,8	83,8	84,8	83,6	84,5	84,3
Средний фактор формы, %:								
S_n	85,5	86,0	85,1	85,6	85,7	86,4	86,1	86,6
S_l	82,9	83,6	82,6	83,0	83,4	84,1	83,7	84,3
S_w	81,5	82,1	80,9	81,3	81,9	82,5	82,0	82,7

Из данных табл. 2, видно, что средняя длина волокон СФАХБЦ после первого цикла использования уменьшается на 0,12...0,14 мм, или на 5...6 %.

При этом размол волокнистой массы в мягком режиме позволяет в максимальной степени сохранить исходную длину первичных и вторичных волокон. Так, средневзвешенные значения длины L_l и L_w для целлюлозы до размола составляют соответственно 2,15 и 2,72 мм, для вторичных волокон из влагопрочной макулатуры – 2,01...2,02 и 2,58 мм соответственно. L_l и L_w для целлюлозы после размола – 2,14 и 2,70 мм соответственно, для вторичных волокон из влагопрочной макулатуры – 1,99...2,00 и 2,57...2,58 мм соответственно. Поскольку рубки волокон, как следует из рассчитанных значений коэффициента укорочения волокон, практически не происходит, повышение степени помола волокнистой массы связано преимущественно с процессами внешнего и внутреннего фибриллирования волокон.

В отличие от первичных волокон СФАХБЦ, для вторичных волокон характерно некоторое увеличение их полидисперсности в процессе мягкого размола. Средняя ширина вторичных волокон и их коэффициент вытянутости с учетом стандартного отклонения показателей в ходе размола изменяются не существенно. Размолотые вторичные волокна, как видно из табл. 2, имеют коэффициенты вытянутости $(L/W)_l$ и $(L/W)_w$ в пределах 66,3...66,5 и 83,6...84,3 соответственно. Растительные волокна являются пригодными для изготовления бумаги, когда коэффициент вытянутости составляет более 33 [30], если он находится на уровне 70...80, то может быть получена бумага с хорошей механической прочностью [6]. Приведенные экспериментальные данные показывают, что последнему условию соответствуют не только первичные волокна СФАХБЦ, но и полученные на ее основе вторичные волокна из влагопрочной макулатуры.

Мягкий размол волокнистой массы приводит к некоторому распрямлению волокон. Это проявляется в статистически значимом увеличении среднего фактора формы с повышением степени помола волокнистой массы. При этом фактор формы вторичных волокон, полученных в условиях ускоренного роспуска влагопрочной макулатуры с применением химических активаторов, выше, чем при использовании продолжительной щелочной обработки.

В табл. 3 приведены результаты расчетов, характеризующие как общий эффект, так и отдельные вклады в улучшение фактора формы вторичных волокон, достигаемые процессами ускоренного роспуска влагопрочной макулатуры и мягкого размола волокнистой массы.

Как видно из табл. 3, ускоренный роспуск обеспечивает в среднем 60 %, а мягкий размол в среднем 40 % от общего эффекта повышения фактора формы вторичных волокон за счет использования комбинации таких условий масоподготовки.

В случае повышения фактора формы размолотой СФАХБЦ с 81,3 до 84,6 %, или на 3,3 %, индекс прочности при растяжении бумаги возрастает приблизительно на 15 Н·м/г [20]. Таким образом, наблюдаемое увеличение прямизны волокон на 1,5...1,7 % является весьма значительным. Поскольку фактор формы (прямызна) служит количественной мерой всех видов имеющихся деформаций волокон [19], как обратимых, так и необратимых, то закономерно, что должна наблюдаться корреляция между фактором формы и числом изломов вторичных волокон. Это подтверждают данные рис. 6, а.

Таблица 3

**Влияние ускоренного роспуска влагопрочной макулатуры и мягкого размола
волокнистой массы на фактор формы вторичных волокон**

**Effect of accelerated wet-strength paper repulping and pulp gentle refining
on fiber shape factor**

Условия массоподготовки	Метод расчета	Вид обработки					
		NaOH		NaOH + + Na ₂ S ₂ O ₈		NaOH + + KHSO ₅	
		Степень помола, °ШП					
		24	36	24	36	24	36
		Фактор формы S _p , %					
		82,6	83,0	83,4	84,1	83,7	84,3
Эффект ускоренного роспуска	$S_{I}^{Na_2S_2O_8 24} - S_{I}^{NaOH 24}$ $S_{I}^{KHSO_5 24} - S_{I}^{NaOH 24}$	–		+0,8 (55)		+1,1 (65)	
Эффект мягкого размола	$S_{I}^{Na_2S_2O_8 36} - S_{I}^{Na_2S_2O_8 24}$ $S_{I}^{KHSO_5 36} - S_{I}^{KHSO_5 24}$	–		+0,7 (45)		+0,6 (35)	
Общий эффект	$S_{I}^{Na_2S_2O_8 36} - S_{I}^{NaOH 24}$ $S_{I}^{KHSO_5 36} - S_{I}^{NaOH 24}$	–		+1,5 (100)		+1,7 (100)	

Примечание: В скобках приведены значения вклада (%) для каждой из данных стадий массоподготовки относительно общего достигаемого эффекта, принятого за 100 %.

Число изломов вторичных волокон зависит от параметров основных стадий массоподготовки влагопрочной макулатуры – роспуска и размола. На рис 6, б видно: сокращение продолжительности роспуска макулатуры в результате использования специальных реагентов, а также мягкий размол волокнистой массы способствуют снижению числа изломов вторичных волокон в расчете на 1 мм длины и на 1 волокно.

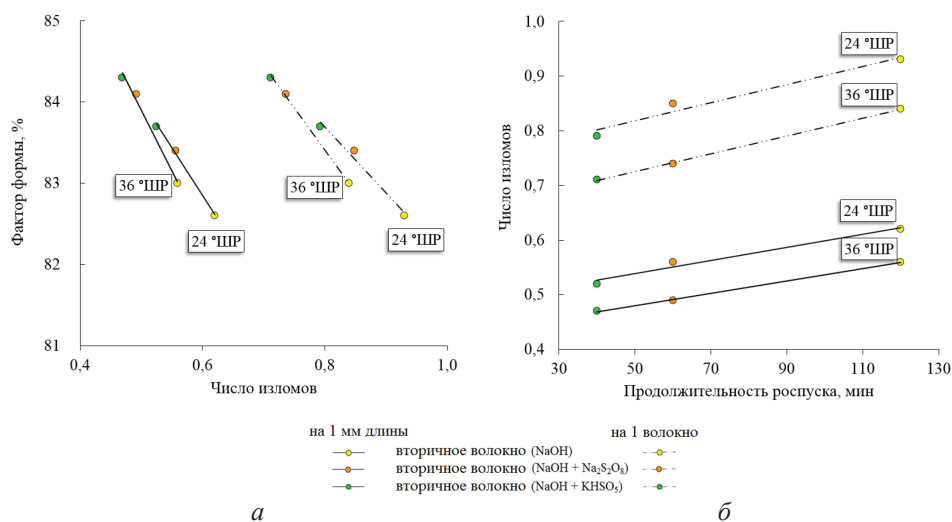


Рис. 6. Зависимости: а – фактора формы от числа изломов; б – числа изломов от продолжительности роспуска и степени помола

Fig. 6. Number of kinks (per mm and per fiber) versus fiber shape factor (а) and wet-strength paper repulping time versus number of kinks (б)

Возможность уменьшения числа изломов, повышения фактора формы вторичных волокон и, следовательно, увеличения механической прочности бумаги из влагопрочной макулатуры за счет сочетания особых условий массоподготовки (ускоренный роспуск и мягкий размол) имеет особое значение при переработке влагопрочной макулатуры в виде микрокрепированной бумаги.

Это связано с тем, что в процессе микрокрепирования происходит механическая деформация волокон (рис. 7, *а*), которая может быть в значительной степени устранена в процессе соответствующей массоподготовки (рис. 7, *б*).



Рис. 7. Сканограммы поверхности бумаги (сканирующая электронная микроскопия, увеличено в 100 раз): *а* – микрокрепированная влагопрочная макулатура; *б* – бумага на основе вторичного волокна

Fig. 7. SEM images (100x magnification): *a* – initial wet-strength crepe paper; *b* – recycled paper

Заключение

Исследованы структурно-морфологические свойства вторичного волокна, полученного из влагопрочного сырья в условиях роспуска с использованием персульфата натрия и моноперсульфата калия, и мягкого размола волокнистой массы.

Установлено, что вторичные волокна до и после размола в целом имеют близкую форму распределения по длине к первичным волокнам беленой сульфатной хвойной целлюлозы, средняя длина которых после первого цикла использования уменьшается незначительно – на 0,12...0,14 мм, или на 5...6 %. Рубки волокон в соответствии с рассчитанными значениями коэффициента укорочения волокон практически не происходит, а повышение степени помола волокнистой массы связано преимущественно с протеканием процессов внешнего и внутреннего фибриллирования. Отмечается, что бережное механическое воздействие при размоле волокнистой массы не сопровождается дополнительным увеличением ширины вторичных волокон в результате механического сдавливания и снижением коэффициента их вытянутости по длине и по массе, значения которого соответствуют полуфабрикатам с высоким бумагообразующим потенциалом (66,3...66,5 и 83,6...84,3).

Мягкий размол волокнистой массы, полученной в условиях ускоренного роспуска влагопрочной макулатуры, приводит к определенному распрям-

лению волокон, что проявляется в увеличении их среднего фактора формы. Ускоренный роспуск обеспечивает в среднем 60 %, а мягкий размол в среднем 40 % от общего эффекта повышения фактора формы вторичных волокон за счет использования комбинации таких условий массоподготовки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Казаков Я.В. Характеристика геометрических параметров волокон целлюлозных полуфабрикатов с использованием вероятностных методов // Химия растит. сырья. 2014. № 1. С. 269–275.

Kazakov Y.V. The Characteristic of Geometrical Parameters of Cellulose Fibers in Pulp Using Probabilistic Approach. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* = Chemistry of plant raw material, 2014, no. 1, pp. 269–275. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.1401269>

2. Пенкин А.А. Рециклинг влагопрочной бумаги санитарно-гигиенического назначения. Ч. 1. Кинетика дезинтеграции вторичного сырья при роспуске // Химия растит. сырья. 2022. № 1. С. 355–365.

Penkin A.A. Recycling of Wet-Strength Tissue Paper. Part 1. Kinetics of Paper Disintegration at Repulping Process. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* = Chemistry of plant raw material, 2022, no. 1, pp. 355–365. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.2022019893>

3. Пузырев С.С., Тюрин Е.Т., Логинова Т.В., Ковалева О.П. Особенности переработки трудноразволокняемой макулатуры // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2006. № 10. С. 40–44.

Puzyrev S.S., Tyurin E.T., Loginova T.V., Kovaleva O.P. Peculiarities of Processing of Pulp with Low Grade of Fiber Elutriation. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton*, 2006, no. 10, pp. 40–44. (In Russ.).

4. Смолин А. Вторичные волокна в современной технологии ЦБП // ЛесПромИнформ. 2015. № 4(110). С. 146–148.

Smolin A.S. Secondary Fibers in Modern Technology of Pulp and Paper Industry. *LesPromInform*, 2015, no. 4(110), pp. 146–148. (In Russ.).

5. Технология целлюлозно-бумажного производства: в 3 т. Т. II. Производство бумаги и картона. Ч. 1. Технология производства и обработки бумаги и картона. СПб.: Политехника, 2005. 423 с.

Technology of Pulp and Paper Production: In 3 Vol. Vol. 2. Production of Paper and Cardboard. Part 1: Technology of Paper and Cardboard Production and Processing. Saint Petersburg, Politekhnik Publ., 2005. 423 p. (In Russ.).

6. Area M.C., Popa V.I. *Wood Fibres for Papermaking*. Shawbury, Smithers Rapra Technology Ltd., 2014. 106 p.

7. Bajpai P. *Recycling and Deinking of Recovered Paper*. London, Elsevier, 2014. 304 p. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-00556-7>

8. Bajpai P. *Pulp and Paper Industry: Chemicals*. Amsterdam, Elsevier, 2016. 327 p. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-02795-5>

9. Belgacem M.N., Pizzi A. *Lignocellulosic Fibers and Wood Handbook: Renewable Materials for Today's Environment*. Weinheim, Wiley, 2016. 704 p. <https://doi.org/10.1002/9781118773727>

10. Chen T., Xie, Y., Wei Q., Wang X., Hagman, O., Karlsson O., Liu J. Effect of Refining on Physical Properties and Paper Strength of *Pinus massoniana* and China Fir Cellulose Fibers. *BioResources*, 2016, vol. 11, no. 3, pp. 7839–7848. <https://doi.org/10.15376/biores.11.3.7839-7848>

11. Debnath M., Salem K.S., Naithani V., Musten E., Hubbe M.A., Pal L. Soft Mechanical Treatments of Recycled Fibers Using a High-Shear Homogenizer for Tissue and Hygiene Product. *Cellulose*, 2021, vol. 28, pp. 7981–7994. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04024-0>

12. Espy H.H. The Mechanism of Wet-Strength Development in Paper: A Review. *TAPPI Journal*, 1995, vol. 78, no. 4, pp. 90–99.
13. Espy H.H., Geist G.W. Persulfates as Repulping Reagents for Neutral/Alkaline Wet-Strength Broke. *TAPPI Journal*, 1993, vol. 76, no. 2, pp. 139–142.
14. Ferdous T., Quaiyyum M.A., Bashar S., Jahan M.S. Anatomical, Morphological and Chemical Characteristics of Kaun Straw (*Seetaria-Italika*). *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 2020, vol. 35, iss. 2, pp. 288–298. <https://doi.org/10.1515/npprj-2019-0057>
15. Fu Y., Wang R., Li D., Wang Z., Zhang F., Meng Q., Qin M. Changes in the Microstructure and Properties of Aspen Chemithermomechanical Pulp Fibres during Recycling. *Carbohydrate Polymers*, 2015, vol. 117, pp. 862–868. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.10.036>
16. Gharehkhani S., Sadeghinezhad E., Kazi S.N., Yarmand H., Badarudin A., Safaei M.R., Zubir M.N.M. Basic Effects of Pulp Refining on Fiber Properties – A Review. *Carbohydrate Polymers*, 2015, vol. 115, pp. 785–803. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.08.047>
17. Holik H. *Handbook of Paper and Board*. Weinheim, Wiley, 2013. 992 p. <https://doi.org/10.1002/9783527652495>
18. Hubbe M.A., Venditti R.A., Rojas O.J. What Happens to Cellulosic Fibers during Papermaking and Recycling? A Review. *BioResources*, 2007, vol. 2, no. 4, pp. 739–788. <https://doi.org/10.15376/biores.2.4.739-788>
19. Karlsson H. *Fibre Guide: Fibre Analysis and Process Applications in the Pulp and Paper Industry*. Kista, AB Lorentzen & Wettre, 2006. 120 p.
20. Karlsson H. et al. Online Standardized Measurements of Pulp and Stock Quality. *65th Appita Annual Conference and Exhibition: Conference Technical Papers*. Carlton, Vic., Appita Inc., 2011, pp. 251–258.
21. Kerekes R.J. Characterizing Refining Action in PFI Mills. *TAPPI Journal*, 2005, vol. 4, no. 3, pp. 9–13.
22. Lin B., He B., Liu Y., Ma L. Correlation Analysis for Fiber Characteristics and Strength Properties of Softwood Kraft Pulps from Different Stages of a Bleaching Fiber Line. *BioResources*, 2014, vol. 9, no. 3, pp. 5024–5033. <https://doi.org/10.15376/biores.9.3.5024-5033>
23. Molin U., Daniel G. Effects of Refining on the Fibre Structure of Kraft Pulps as Revealed by FE-SEM and TEM: Influence of Alkaline Degradation. *Holzforschung*, 2004, vol. 58, iss. 3, pp. 226–232. <https://doi.org/10.1515/HF.2004.035>
24. Motamedian H.R., Halilović A.E., Kulachenko A. Mechanisms of Strength and Stiffness Improvement of Paper after PFI Refining with a Focus on the Effect of Fines. *Cellulose*, 2019, vol. 26, pp. 4099–4124. <https://doi.org/10.1007/s10570-019-02349-5>
25. Obokata T., Isogai A. The Mechanism of Wet-Strength Development of Cellulose Sheets Prepared with Polyamideamine-Epichlorohydrin (PAE) Resin. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2007, vol. 302, iss. 1-3, pp. 525–531. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2007.03.025>
26. Saito T., Isogai A. Novel Method to Improve Wet Strength of Paper. *TAPPI Journal*, 2005, vol. 4, no. 3, pp. 3–8.
27. Shen X., Li B., Mo W., Chai X.-S. Effects of a PFI Refiner's Operational Parameters on the Swellability of Recycled Fiber. *TAPPI Journal*, 2020, vol. 19, no. 5, pp. 239–246. <https://doi.org/10.32964/TJ19.5.239>
28. Siqueira E.J., Salon M.-C.B., Belgacem M.N., Mauret E. Carboxymethylcellulose (CMC) as a Model Compound of Cellulose Fibers and Polyamideamine Epichlorohydrin (PAE) – CMC Interactions as a Model of PAE – Fibers Interactions of PAE-Based Wet Strength Papers. *Journal of Applied Polymer Science*, 2015, vol. 132, iss. 26, art. 42144. <https://doi.org/10.1002/app.42144>
29. Wistara N.J., Young R.A. Properties and Treatments of Pulps from Recycled Paper. Part I. Physical and Chemical Properties of Pulps. *Cellulose*, 1999, vol. 6, pp. 291–324. <https://doi.org/10.1023/A:1009221125962>

30. Xu F., Zhong X., Sun R.C., Lu Q. Anatomy, Ultrastructure and Lignin Distribution in Cell Wall of *Caragana Korshinskii*. *Industrial Crops and Products*, 2006, vol. 24, iss. 2, pp. 186–193. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2006.04.002>

31. Yang D., DiFlavio J.-L., Gustafsson E., Pelton R. Wet-Peel: A Tool for Comparing Wet-Strength Resins. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 2018, vol. 33, iss. 4, pp. 632–646. <https://doi.org/10.1515/npprj-2018-0013>

32. Yang R., Luetgen C. Repulping of Wet Strength Paper Towel with Potassium Monopersulfate. *TAPPI Journal*, 2020, vol. 19, no. 9, pp. 463–470. <https://doi.org/10.32964/TJ19.9.463>

33. Yang X., Berglund L.A. Recycling without Fiber Degradation – Strong Paper Structures for 3D Forming Based on Nanostructurally Tailored Wood Holocellulose Fibers. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, vol. 8, no. 2, pp. 1146–1154. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06176>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья

УДК 66.092-977

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-5-173-185

Контроль качества активированного угля методом ядерного магнитного резонанса

*Р.Г. Сафин*¹, *д-р техн. наук, проф.*; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5790-4532>

В.Г. Сотников^{1✉}, *аспирант*; ResearcherID: [AAE-2116-2022](https://orcid.org/0000-0002-6202-5487),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6202-5487>

*Л.Ю. Грунин*², *канд. хим. наук, доц.*; ResearcherID: [H-9850-2014](https://orcid.org/0000-0001-6195-042X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6195-042X>

*М.С. Иванова*², *аспирант*; ResearcherID: [AAE-5934-2022](https://orcid.org/0000-0001-8588-5909),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8588-5909>

*Д.Ф. Зиятдинова*¹, *д-р техн. наук, проф.*; ResearcherID: [M-7871-2016](https://orcid.org/0000-0003-2801-4642),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2801-4642>

¹Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. К. Маркса, д. 68, г. Казань, Республика Татарстан, Россия, 420015; safin@kstu.ru, vcvcvc12345678@gmail.com✉, ziatdinova2804@gmail.com

²Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Россия, 424000; mobilenmr@hotmail.com, mariya-ivanova@list.ru

Поступила в редакцию 21.01.22 / Одобрена после рецензирования 24.04.22 / Принята к печати 28.04.22

Аннотация. Производство активированного угля методом пирогенетического разложения – это сложный высокотемпературный процесс, проходящий в несколько этапов. Качество получаемого активированного угля в основном зависит от влажности исходного сырья и степени удаления примесей из твердого углеродистого остатка. Оперативная оценка этих параметров с учетом специфики производства сильно затруднена. Применение методов ЯМР-релаксометрии может существенно ускорить процесс измерения данных параметров в *at-line*, *on-line* и *in situ* условиях. Цель исследования – определение абсолютной влажности исходного сырья, промежуточных и готовых продуктов, а также контроль их степени пиролиза на различных этапах производства активированного угля по протонной плотности. В качестве объектов исследования выступали образцы лигниноцеллюлозной группы, от влажного сырья до готового продукта. Для измерения влажности образцов и их протонной плотности проводили эксперименты ЯМР с импульсной последовательностью Magic Sandwich Echo (MSE). Выявлена однозначная корреляция протонной плотности и степени пиролиза изучаемых материалов. Экспериментальные результаты могут быть применены для дальнейшего усовершенствования предложенных методик оценки указанных параметров. Установлено, что эксперимент MSE позволяет довольно точно определить влажность как исходного растительного сырья, так и продуктов карбонизации, включая активированный уголь. Представлены данные по динамике изменения протонной плотности образцов растительного сырья при термическом разложении. Обнаружена прямая корреляция изменения протонной плотности образцов и их удельной плотности при термической переработке. Протонная плотность образцов исходного сырья имеет различные значения, в то время как про-

тонная плотность образцов угля различается гораздо меньше. Данное наблюдение говорит о том, что из образцов удаляются химические вещества, в связи с чем плотность протонов падает. Результаты исследования позволят усовершенствовать системы промежуточного и окончательного контроля в процессе получения активированного угля методом термической переработки.

Ключевые слова: активированный уголь, пиролиз, ядерный магнитный резонанс, протонная плотность, степень пиролиза

Благодарности: Исследование проведено с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Наноматериалы и нанотехнологии» Казанского национального исследовательского технологического университета при финансовой поддержке проекта Минобрнауки России в рамках гранта № 075-15-2021-699.

Для цитирования: Сафин Р.Г., Сотников В.Г., Грунин Л.Ю., Иванова М.С., Зиятдинова Д.Ф. Контроль качества активированного угля методом ядерного магнитного резонанса // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 5. С. 173–185. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-173-185>

Original article

Quality Control of Activated Carbon by the Nuclear Magnetic Resonance Method

Rushan G. Safin¹, Doctor of Engineering, Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5790-4532>

Viktor G. Sotnikov², Postgraduate Student; ResearcherID: [AAE-2116-2022](https://orcid.org/0000-0002-6202-5487),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6202-5487>

Leonid Yu. Grunin², Candidate of Chemistry, Assoc. Prof.; ResearcherID: [H-9850-2014](https://orcid.org/0000-0001-6195-042X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6195-042X>

Maria S. Ivanova², Postgraduate Student; ResearcherID: [AAE-5934-2022](https://orcid.org/0000-0001-8588-5909),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8588-5909>

Dilyara F. Ziatdinova¹, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [M-7871-2016](https://orcid.org/0000-0003-2801-4642),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2801-4642>

¹Kazan National Research Technological University, ul. K. Marksa, 68, Kazan, Republic of Tatarstan, 420015, Russian Federation; safin@kstu.ru, vcvvcvc12345678@gmail.com[✉], ziatdinova2804@gmail.com

²Volga State University of Technology, pl. Lenina, 3, Yoshkar-Ola, Republic of Mari El, 424000, Russian Federation; mobilenmr@hotmail.com, mariya-ivanova@list.ru

Received on January 21, 2022 / Approved after reviewing on April 24, 2022 / Accepted on April 28, 2022

Abstract. The production of activated carbon by pyrogenetic decomposition is a complex high-temperature process that involves several stages. The quality of the produced activated carbon primarily depends on the moisture content of raw material and the degree of removal of impurities from the solid carbon residue, operational assessment of which is rather difficult due to the production specifics. The use of NMR relaxometry methods can significantly speed up the process of measuring these parameters in *at-line*, *on-line* and *in situ* conditions. The research aims at determining the absolute moisture content of the raw material, intermediate and finished products, as well as controlling their pyrolysis degree at different stages of activated carbon production via proton density. Samples of



the lignocellulosic group (from wet raw material to the finished product) were the research objects. NMR experiments with the Magic Sandwich Echo (MSE) pulse sequence were carried out for measuring the moisture content and proton density of the samples. The study revealed an unambiguous correlation between the values of proton density and the pyrolysis degree of the samples. The experimental results can be used in further improvement of the proposed methods for estimating the specified parameters. It was found that the MSE experiment makes it possible to determine quite accurately the moisture content in both the initial plant raw material and the carbonization products, including activated carbon. The paper presents data on the dynamics of changes in the proton density of samples of plant raw materials during thermal decomposition. A direct correlation was found between changes in the proton density of the samples and their specific density during thermal processing. The proton density of the raw material samples has different values, while the proton density of the carbon samples varies much less. This observation shows that chemicals are being removed from the samples, causing the proton density to decrease. The research results will improve the systems of intermediate and final control in the process of obtaining activated carbon by thermal processing.

Keywords: activated carbon, pyrolysis, nuclear magnetic resonance, proton density, pyrolysis degree

Acknowledgments: The research was carried out using the equipment of the Center for Collective Use “Nanomaterials and Nanotechnologies” of the Kazan National Research Technological University with the financial support of the project by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of grant No. 075-15-2021-699.

For citation: Safin R.G., Sotnikov V.G., Grunin L.Yu., Ivanova M.S., Ziatdinova D.F. Quality Control of Activated Carbon by the Nuclear Magnetic Resonance Method. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 5, pp. 173–185. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-173-185>

Введение

Активированный уголь – ценный для промышленности продукт, который может быть получен из различного неликвидного сырья. Активированный уголь высокого качества целесообразно производить в вертикальных ретортах по принципу пиролиза с последующей паровой активацией. Данный метод предполагает непрерывность процесса, поэтому особую сложность представляет оперативный контроль промежуточных продуктов на разных этапах производства [5, 6].

В современных установках для получения активированного угля применяют следующие технологические операции: сушку исходного сырья; термическое разложение; активацию карбонизата; охлаждение активированного угля [5]. Промежуточный контроль можно выполнять на каждой стадии производства путем забора проб. На сегодняшний день существуют экспресс-методы определения физико-химических параметров, наиболее точным является ядерный магнитный резонанс (ЯМР) [1, 4].

Явление ЯМР заключается в резонансном поглощении электромагнитной энергии макроскопической системой ядерных магнитных моментов, помещенных в постоянное внешнее магнитное поле. ЯМР используют в интроскопии, где он больше известен как магнитно-резонансная томография (МРТ), и в спектроскопии. Именно спектроскопия ЯМР в основном применяется для контроля качества продукции.

В частности, для мониторинга физико-химических показателей исходного сырья, промежуточных продуктов пиролиза и готового активированного угля может быть выбран метод ^1H ЯМР-релаксометрии, который активно применяется для исследования физико-химических свойств пористой структуры различных адсорбентов и горных пород, совместного содержания влаги и жира, процессов замораживания [2, 3]. Преимущества данного метода заключаются в скорости анализа, высокой воспроизводимости результатов, отсутствии разрушающего воздействия на образец. Кроме того, используемый при этом прибор не требует специальной подготовки образца, а анализ – оператора высокой квалификации [12].

В ^1H ЯМР-релаксометрии существуют параметры спин-решеточной (T_1) продольной и спин-спиновой (T_2) поперечной составляющей вектора ядерной намагниченности. По времени этих параметров разработаны эксперименты для параметра T_1 : насыщение-восстановление (Saturation-Recovery, SR) и инверсия-восстановление (Inversion-Recovery, IR); для параметра T_2 : эксперименты спада свободной индукции (Free Induction Decay, FID), «сплошное эхо» (Solid Echo, SE) и «магическое сэндвич-эхо» (Magic Sandwich Echo, MSE), последний имеет наибольшую эффективность в сравнении с первыми двумя экспериментами [7, 17].

Эксперименты ЯМР в сочетании с методом изопиестических серий показали хорошие результаты при описании структуры и свойств целлюлозы, где в качестве зонда выступали молекулы воды [2, 3]. Однако научных исследований взаимодействия древесных и активированных углей с водой методами ЯМР не так много [16–18]. В этой работе рассмотрено применение экспериментов ЯМР для оценки абсолютной влажности и выявления корреляции протонной плотности и степени пиролиза анализируемых образцов.

Объекты и методы исследования

Наибольшее распространение в России имеет активированный уголь марок БАУ (березовый активированный уголь). Однако существуют технологии получения активированного угля из различных отходов растительного происхождения. В работе рассматриваются отходы древесины лиственницы, скорлупы грецкого ореха, льняной ткани. Выбор данных отходов обусловлен различием в дольных содержаниях целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина.

Образцы древесины лиственницы, льняной ткани, скорлупы грецкого ореха (табл. 1) были подвергнуты термическому воздействию на экспериментальном стенде (рис. 1) с целью получения образцов с разной степенью пиролиза, включая активированный уголь [5]. Экспериментальный стенд для пирогенетического разложения растительных отходов состоял из камеры пиролиза 1, муфельной печи 2, сепаратора 3, мерника дистиллята 4, гидрозатвора 5, сборника газа 6.

Измерения ЯМР производили на сухих, воздушно-сухих и равновесно увлажненных водяным паром образцах. Исходное сырье сушили при 105 ± 2 °C до постоянной массы, а угли после пиролиза и активации – при 200 ± 2 °C. Для равновесного увлажнения пробы выдерживали в эксикаторе с содержанием влажности по отношению к сухому веществу 100 % при 20 ± 1 °C в течение недели.

Таблица 1

Образцы для физико-химического анализа
Samples for physical and chemical analysis

Наименование	Продолжительность пиролиза, мин	Лиственница	Скорлупа грецкого ореха	Льняная ткань
Сырье влажное	–	+	–	+
Сырье сухое	–	+	+	+
Обугленное сырье	30	+	+	–
Уголь 1	50	+	+	–
Уголь 2	70	+	+	+
Уголь 3	100	+	+	+
Уголь активированный	100	+	+	+
Уголь активированный увлажненный	100	+	–	–

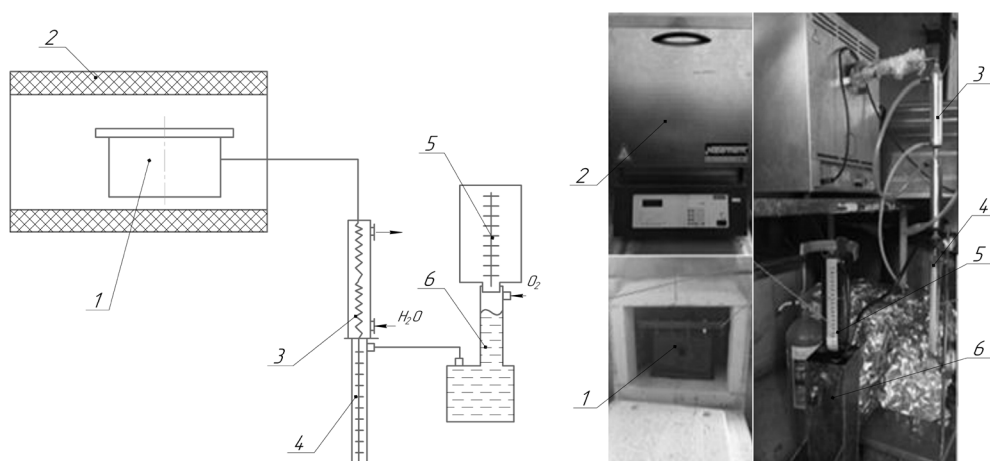


Рис. 1. Схема и внешний вид экспериментального стенда для пиролиза растительных отходов

Fig. 1. Scheme and appearance of the test stand for plant waste pyrolysis

Для оценки абсолютной влажности и протонной плотности образцов был выбран импульсный эксперимент MSE. Данный эксперимент состоит из импульса 90° , за которым следует временная задержка длиной τ , затем цикл из 2 импульсов 90° с одинаковой фазой и 2 блоками импульсов между ними. Каждый блок включает 4 импульса 90° . Фазы блоков импульсов инвертированы по отношению друг к другу. После применения последовательности импульсов и временной задержки генерируется «магическое эхо» (рис. 2). Таким образом, удвоенный цикл импульсами 90° позволяет достигнуть «обращения времени», тем самым восстанавливая утерянный сигнал как эхо. MSE требует 4-ступенчатого фазового циклирования [16, 17].

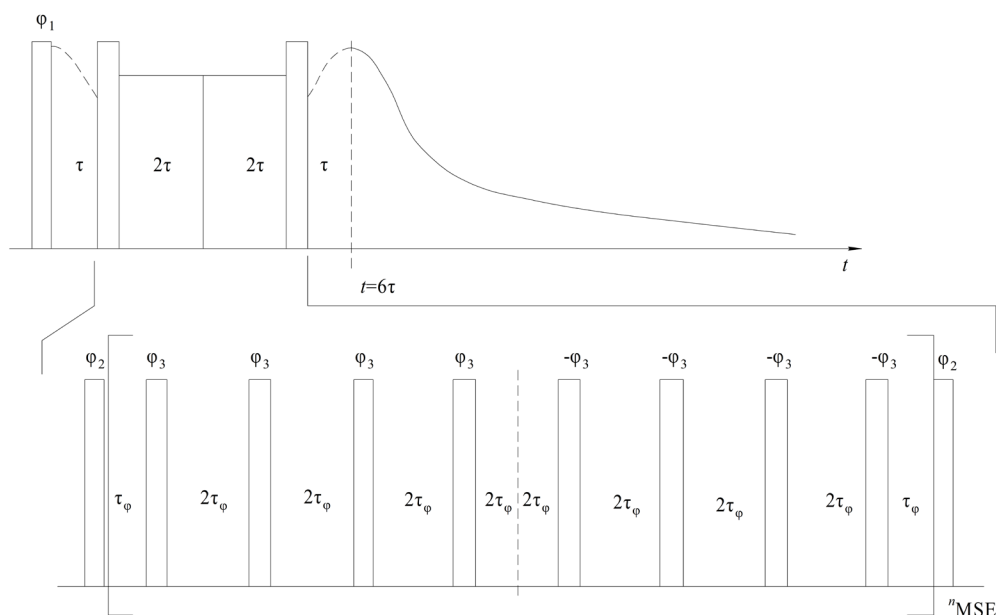


Рис. 2. Импульсная диаграмма MSE

Fig. 2. MSE pulse diagram

Исследования проведены при помощи ЯМР-анализатора (рис. 3), принцип действия которого основан на возбуждении спиновой системы исследуемого образца, находящегося в постоянном магнитном поле. Простейший ЯМР-релаксометр состоит из электронного блока, включающего в себя передатчик сигнала RX и выводное устройство TX, и магнитной системы с датчиком. Управление осуществляется специальным программным обеспечением [19–21].

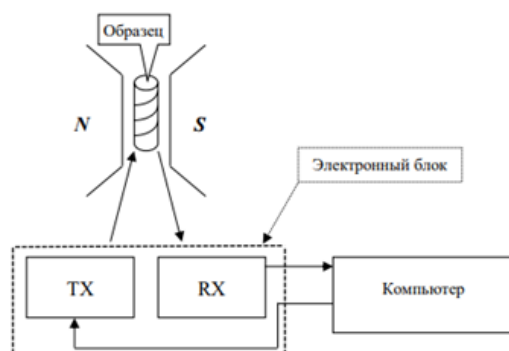


Рис. 3. Схема устройства ЯМР-анализатора

Fig. 3. Structure diagram of the NMR analyzer

Все измерения выполнены на ЯМР-анализаторе Spin Track, оперирующем на частоте 19 МГц для ядер водорода. Температуру магнита ЯМР-анализатора поддерживали с помощью термоконтроллера на уровне 30 °С. Длительность 90° импульса была равна 3,3 мкс, а 180° – 6,5 мкс; время звона приемного тракта устройства – 12 мкс; время между сканированиями – 1200 мс. Помимо вышеприведенных значений настроек системы, в программном обеспечении Relax8 были заданы количество сканирований – 100, усиление приемника – 6.

Результаты исследования и их обсуждение

Измерение спада свободной индукции (FID) с помощью последовательности MSE позволяет определять влагосодержание образца и его протонную плотность. Численная оценка параметров основывается на расчетах с применением усредненных амплитуд сигналов, поскольку такой способ дает хорошо воспроизводимые результаты. Ниже подробно рассмотрено определение каждого из этих параметров [13–15].

Так, для измерения абсолютной влажности необходимо найти отношение усредненной амплитуды сигнала FID от сорбированной воды A_w к усредненной амплитуде FID образца A_0 [9–11] с учетом их протонных населенностей ρ_{Hw} и ρ_{H0} :

$$w = \frac{A_w}{A_0} \cdot \frac{\rho_{H0}}{\rho_{Hw}} \cdot 100 \text{ \%}.$$

В табл. 2 показаны результаты измерения абсолютной влажности образцов в воздушно-сухом и равновесно увлажненном состояниях.

Таблица 2

Результаты измерения абсолютной влажности образцов T , % ($P = 0,95$; $n = 5$)

Results of measuring the absolute moisture content of samples ($P = 0.95$; $n = 5$)

Образец	Состояние	
	воздушно-сухое	равновесно увлажненное
Древесина лиственницы	9,24 ± 0,45	25,31 ± 4,20
Скорлупа грецкого ореха	2,43 ± 0,63	10,67 ± 0,80
Льняная ткань	1,76 ± 0,25	45,89 ± 6,20
Древесный уголь	5,69 ± 0,56	11,01 ± 0,65
Биоуголь из скорлупы грецкого ореха	5,52 ± 0,40	12,34 ± 0,68
Биоуголь из ткани льна	5,34 ± 0,50	15,39 ± 0,74
Активированный уголь из древесины лиственницы	3,01 ± 0,33	9,23 ± 0,90
Активированный уголь из скорлупы грецкого ореха	3,97 ± 0,30	9,11 ± 0,66
Активированный уголь из ткани льна	2,54 ± 0,48	8,65 ± 0,62
Аптечный активированный уголь	8,41 ± 1,0	27,22 ± 0,56

Сорбция воды способна вызывать набухание проб. Результаты вычитания из показателей влажных образцов амплитуд MSE тех же образцов при сухих состояниях представлены на рис. 4. Предполагается, что начальный возрастающий участок графика свидетельствует о возникающем набухании в пробах, которое проявляется в переходе части жесткой решетки в подвижное состояние при увеличении межпротонных расстояний в процессе увлажнения. В древесине этому явлению способствуют лигнин и гемицеллюлозы. Набухание древесного угля, вероятно, связано с наличием аморфных (менее упорядоченных) областей, которые возникли под влиянием воды, находящейся в закрытых порах. Активация перегретым водяным паром, скорее всего, привела к раскрытию некоторой доли закрытых пор

и высвобождению молекул воды, а также к уплотнению структуры угля. По этой причине в активированном угле лиственницы практически не происходит набухания.

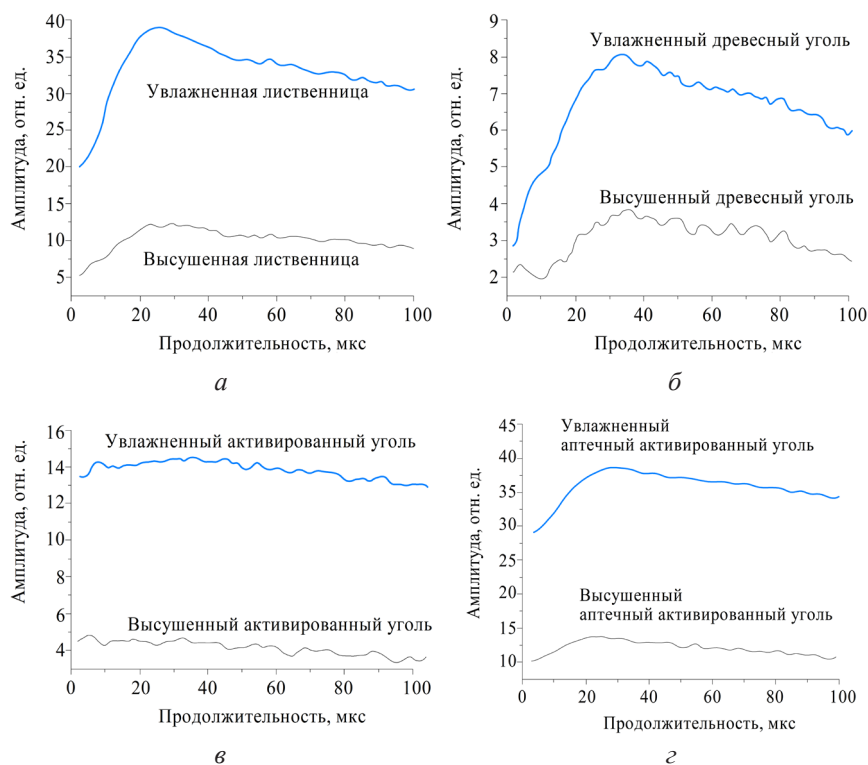


Рис. 4. Амплитуды MSE в образцах: *а* – лиственницы; *б* – древесного угля; *в* – активированного угля; *г* – аптечного активированного угля

Fig. 4. MSE amplitudes: *a* – in larch samples; *б* – in charcoal samples; *в* – in activated carbon samples; *г* – in pharmacy activated carbon samples

Протонная плотность (или массовая доля атомов водорода) сухих образцов может рассматриваться в качестве показателя наличия оставшихся фрагментов органических соединений после стадии пиролиза. Для оценки этого показателя используются спад MSE эталонного образца, например дистиллированной воды (так как известен ее химический состав), и следующее соотношение:

$$\rho_{p_dry} = \frac{A_{dry}(0)N_p}{A_w m_{dry}},$$

где $A_{dry}(0)$ – амплитуда MSE образца в нулевой момент времени; N_p – количество протонов в воде; m_{dry} – масса сухого образца.

В ходе проведения экспериментов по изучению протонной плотности образцов были получены зависимости, представленные на рис. 5.

Для каждого образца проводили 3 эксперимента по пиролизу и 1 по активации. Также были измерены протонные плотности сухих образцов.

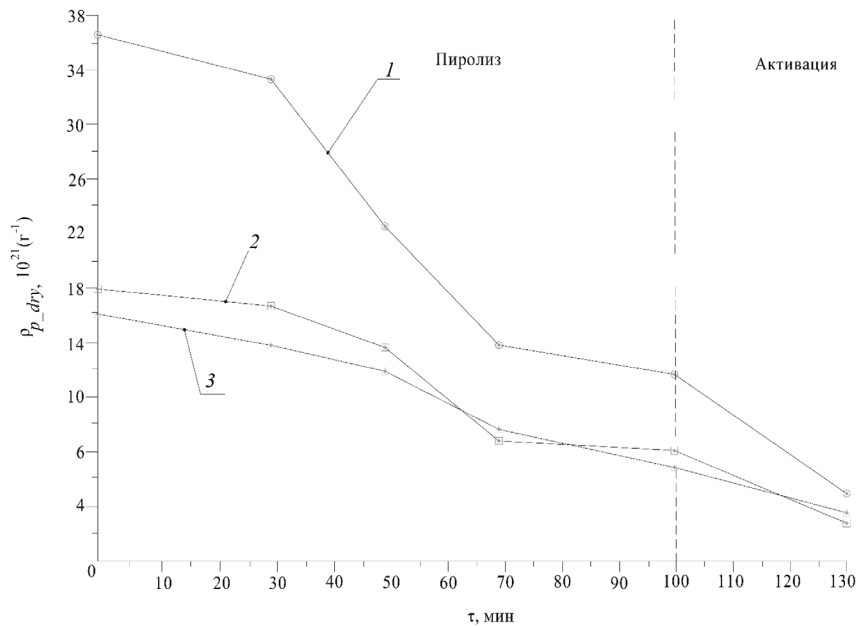


Рис. 5. Изменение протонной плотности по продолжительности термического воздействия: 1 – древесина лиственницы; 2 – льняная ткань; 3 – скорлупа грецкого ореха

Fig. 5. Change in proton density over the thermal exposure time: 1 – larch wood; 2 – flax fabric; 3 – walnut shell

На начальных этапах прогрева в пиролизной камере (30...50 мин) образцы имели совершенно различные концентрации протонов. Через 70 и 100 мин пиролиза кривые стабилизировались. Даже среди пиролизных продуктов лигниноцеллюлозных отходов концентрация протонов различалась более чем в 1,5 раза после пиролиза. Данное явление можно объяснить содержанием в древесине тяжелых смол, следы которых остались в древесном угле по завершении пиролиза.

Измерение протонной плотности образцов после паровой активации практически не изменило соотношений. Например, протонная плотность активированного угля лиственницы составила $4,7 \cdot 10^{21} \text{ г}^{-1}$, в то время как у тканей – $2,86 \cdot 10^{21} \text{ г}^{-1}$. Сопоставление этих значений показывает, что соотношение осталось более чем в 1,5 раза выше для древесины. Из экспериментальных и литературных данных нам известно, что выход продукции активированного угля для древесины составляет 15...18 % от общей удельной массы [18]. По результатам эксперимента мы установили, что протонная плотность активированного угля на основе лиственницы – 16,8 % от протонной плотности исходной древесины. Очевидно, степень пиролиза зависит от продолжительности термического воздействия [8].

На рис. 6 представлена гистограмма такой зависимости. Полное удаление примесей из углеродистого остатка соответствует 100 %-й степени пиролиза.

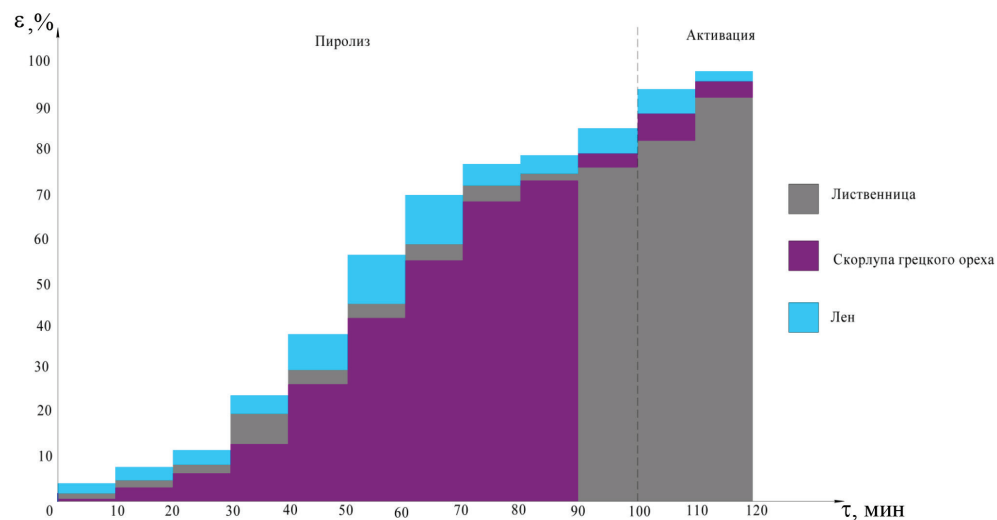


Рис. 6. Зависимость степени пиролиза древесины лиственницы от продолжительности термического воздействия

Fig. 6. Dependence of the pyrolysis degree of larch wood on the thermal exposure time

По данным рис. 5 и 6 получена зависимость степени пиролиза древесины лиственницы от ее протонной плотности. Согласно рис. 7, уменьшение количества протонов в единице массы образца соответствует общему уменьшению массы перерабатываемого сырья. Таким образом, по измеренному значению протонной плотности можно оперативно определять степень пиролиза сырья.

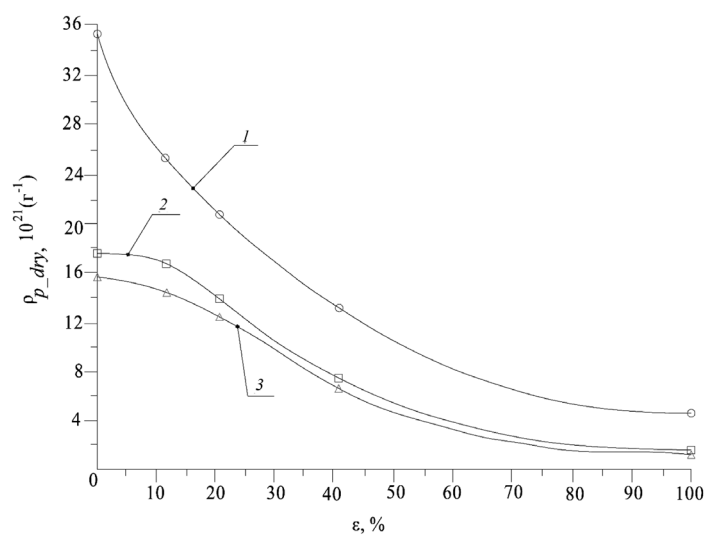


Рис. 7. Зависимость протонной плотности образцов от их степени пиролиза: 1 – лиственница; 2 – льняная ткань; 3 – скорлупа грецкого ореха

Fig. 7. Dependence of proton density of the samples on their pyrolysis degree: 1 – larch; 2 – flax fabric; 3 – walnut shell

Описанные выше подходы могут быть использованы при создании цифровых моделей для автоматизированных систем контроля качества промежуточной и готовой продукции на производстве активированного угля. Методы ^1H ЯМР-релаксометрии применимы для оценки на основе протонной плотности таких параметров, как влагосодержание и степень пиролиза сырья.

Заключение

В ходе исследования протонной плотности было установлено, что в древесном и активированном угле лиственницы присутствуют фрагменты органических соединений, которые выступают в качестве поверхностных активных центров для адсорбирующихся молекул воды. Протонная плотность анализируемых образцов однозначно и монотонно связана с их степенью пиролиза. Согласно данным эксперимента MSE, в лиственнице и древесном угле на ее основе наблюдается частичное набухание при взаимодействии с водяным паром. В целом измерение влагосодержания сырья и продуктов карбонизации показало точные результаты, наибольшая точность наблюдается при измерении сухих образцов. Методы ^1H ЯМР-релаксометрии могут быть применены для оперативного контроля качества промежуточных и готовых продуктов на производстве активированного угля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Гогелашвили Г.Ш., Вартапетян Р.Ш., Ладычук Д.В., Хозина Е.В., Грунин Ю.Б. Энергетические характеристики адсорбированной воды в активных углях по данным ЯМР-релаксации // Журн. физ. химии. 2010. Т. 84, № 2. С. 327–331.
Gogelashvili G.Sh., Vartapetyan R.Sh., Ladychuk D.V., Khozina E.V., Grunin Yu.B. Energy Characteristics of Adsorbed Water in Activate Carbons according to NMR Relaxation Data. *Zhurnal fizicheskoi khimii* = Russian Journal of Physical Chemistry A, 2010, vol. 84, no. 2, pp. 327–331. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0036024410020196>
2. Гогелашвили Г.Ш., Ладычук Д.В., Грунин Ю.Б., Гордеев М.Е., Абзальдинов Х.С. Исследование влияния температуры на состояние активной поверхности микропористых активных углей импульсным методом ЯМР // Вестн. технол. ун-та. 2015. Т. 18, № 13. С. 30–33.
Gogelashvili G.Sh., Ladychuk D.V., Grunin Yu.B., Gordeev M.E., Abzaldinov Kh.S. A Study of the Temperature Effect on the State of the Active Surface of Microporous Activated Carbons by the pulsed NMR method. *Bulletin of the Technological University*, 2015, vol. 18, no. 13, pp. 30–33. (In Russ.).
3. Гогелашвили Г.Ш., Ладычук Д.В., Хозина Е.В., Грунин Ю.Б., Ярошевская Х.М. Состояние сорбированной воды в микропористых активных углях по данным ЯМР-релаксации // Вестн. технол. ун-та. 2015. Т. 18, № 4. С. 50–53.
Gogelashvili G.Sh., Ladychuk D.V., Khozina E.V., Grunin Yu.B., Yaroshevskaya H.M. The State of Sorbed Water in Microporous Activated Carbons according to NMR Relaxation Data. *Bulletin of the Technological University*, 2015, vol. 18, no. 4, pp. 50–53. (In Russ.).
4. Гогелашвили Г.Ш., Хозина Е.В., Вартапетян Р.Ш., Ладычук Д.В., Грунин Ю.Б. Определение размера микропор активных углей импульсным методом ЯМР // Журн. физ. химии. 2011. Т. 85, № 7. С. 1343–1347.

Gogelashvili G.Sh., Khozina E.V., Vartapetyan R.Sh., Ladychuk D.V., Grunin Yu.B. Determining the Sizes of Micropores in Activated Charcoals by the Pulsed NMR Method. *Zhurnal fizicheskoi khimii* = Russian Journal of Physical Chemistry A, 2011, vol. 85, no. 7, pp. 1343–1347. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0036024411070089>

5. Сафин Р.Г., Сотников В.Г., Зиятдинова Д.Ф. Пирогенетическая переработка органических отходов текстильной промышленности в адсорбенты // Изв. вузов. Технология текстил. пром-сти. 2021. № 5(395). С. 229–235.

Safin R.G., Sotnikov V.G., Ziatdinova D.F. Textile Industry Organic Waste Pyrogenetic Processing into Adsorbents. *Textile Industry Technology*, 2021, no. 5(395), pp. 229–235. (In Russ.). https://doi.org/10.47367/0021-3497_2021_5_229

6. Agrafioti E., Bouras G., Kalderis D., Diamadopoulos E. Biochar Production by Sewage Sludge Pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2013, vol. 101, pp. 72–78. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.02.010>

7. Bridle T.R., Pritchard D. Energy and Nutrient Recovery from Sewage Sludge via Pyrolysis. *Water Science and Technology*, 2004, vol. 50, iss. 9, pp. 169–175. <https://doi.org/10.2166/wst.2004.0562>

8. Carey D.E., McNamara P.J., Zitomer D.H. Biochar from Pyrolysis of Biosolids for Nutrient Adsorption and Turfgrass Cultivation. *Water Environment Research*, 2015, vol. 87, iss. 12, pp. 2098–2106. <https://doi.org/10.2175/106143015X14362865227391>

9. Grunin Yu.B., Grunin L.Yu., Gal'braikh L.S., Sheveleva N.N., Masas D.S. Dispersion Peculiarities of Crystalline Cellulose upon Its Moistening. *Fibre Chemistry*, 2018, vol. 49, no. 5, pp. 321–326. <https://doi.org/10.1007/s10692-018-9890-6>

10. Grunin Yu.B., Grunin L.Yu., Ivanova M.S., Masas D.S. Features of the Structural Organization and Sorption Properties of Cellulose. *Fibre Chemistry*, 2020, vol. 51, no. 5, pp. 325–332. <https://doi.org/10.1007/s10692-020-10106-9>

11. Gogelashvili G.Sh., Vartapetyan R.Sh., Ladychuk D.V., Grunin Yu.B., Khozina E.V. Specific Features of the Adsorption and Nuclear Magnetic Relaxation of Water Molecules in Active Carbons. 1. Relation between the Spin-Spin Relaxation of Adsorbed Water Molecules and Structural Parameters of Microporous Active Carbons. *Colloid Journal*, 2003, vol. 65, iss. 5, pp. 545–551. <https://doi.org/10.1023/A:1026159420171>

12. Gogelashvili G.Sh., Vartapetyan R.Sh., Ladychuk D.V., Grunin Yu.B., Khozina E.V. Specific Features of the Adsorption and Nuclear Magnetic Relaxation of the Water Molecules in Active Carbons. *Colloid Journal*, 2004, vol. 66, iss. 3, pp. 271–276. <https://doi.org/10.1023/B:COLL.0000030835.40521.72>

13. Guo J.-C., Zhou H.-Y., Zeng J., Wang K.-J., Lai J., Liu Y.-X. Advances in Low-Field Nuclear Magnetic Resonance (NMR) Technologies Applied for Characterization of Pore Space Inside Rocks: A Critical Review. *Petroleum Science*, 2020, no. 17, pp. 1281–1297. <https://doi.org/10.1007/s12182-020-00488-0>

14. Lewandowski W.M., Radziemska E., Ryms M., Ostrowski P. Modern Methods of Thermochemical Biomass Conversion into Gas, Liquid and Solid Fuels. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 2011, vol. 18, pp. 39–47. <https://doi.org/10.1002/chin.201238271>

15. Liu Z., Hughes M., Tong Y., Zhou J., Kreutter W., Valtierra D., Singer S., Zitomer D., McNamara P. Enhanced Energy and Resource Recovery via Synergistic Catalytic Pyrolysis of Byproducts from Thermal Processing of Wastewater Solids. *Renewable Energy*, 2021, vol. 177, pp. 475–481. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.125>

16. Maus A., Hertlein C., Saalwächter K. A Robust Proton NMR Method to Investigate Hard/Soft Ratios, Crystallinity, and Component Mobility in Polymers. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 2006, vol. 207, pp. 1150–1158. <https://doi.org/10.1002/macp.200600169>

17. Pieruccini M., Sturniolo S., Corti M., Rigamonti A. A Novel Analysis for the NMR Magic Sandwich Echo in Polymers: Application to the α -Relaxation in Polybutadiene. *The European Physical Journal B*, 2015, vol. 88, art. 283. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2015-60417-6>
18. Ozkan A., Kinney K., Katz L., Berberoglu H. Reduction of Water and Energy Requirement of Algae Cultivation Using an Algae Biofilm Photobioreactor. *Bioresource Technology*, 2012, vol. 114, pp. 542–548. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.055>
19. Tremel A., Becherer D., Fendt S., Gaderer M., Spliethoff H. Performance of Entrained Flow and Fluidised Bed Biomass Gasifiers on Different Scales. *Energy Conversion and Management*, 2013, vol. 69, pp. 95–106. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.02.001>
20. Trubetskaya A., Souihi N., Umeki K. Categorization of Tars from Fast Pyrolysis of Pure Lignocellulosic Compounds at High Temperature. *Renewable Energy*, 2019, vol. 141, pp. 751–759. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.033>
21. Umeki K., Häggström G., Bach-Oller A., Kirtania K., Furusjö E. Reduction of Tar and Soot Formation from Entrained-Flow Gasification of Woody Biomass by Alkali Impregnation. *Energy and Fuels*, 2017, vol. 31, pp. 5104–5110. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b03480>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest



Краткое сообщение

УДК 630*8

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-5-186-194

Лесные ресурсы Республики Гана

Д.М. Адаи¹, науч. сотр.; ResearcherID: [AAR-8456-2021](https://orcid.org/0000-0003-1143-8094),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1143-8094>

Д.Ф. Эшун¹, проф., проректор; ResearcherID: [AAS-8733-2021](https://orcid.org/0000-0003-3934-9878),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3934-9878>

Э.Д. Марфо¹, канд. хим. наук, доц.; ResearcherID: [AAR-8989-2021](https://orcid.org/0000-0002-0895-9537),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0895-9537>

Н.А. Бабич², д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [G-7384-2019](https://orcid.org/0000-0001-7463-2519),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7463-2519>

В.И. Мелехов², д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [Q-1051-2019](https://orcid.org/0000-0002-2583-3012),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2583-3012>

Д.Н. Клевцов², канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [A-7791-2019](https://orcid.org/0000-0001-6902-157X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6902-157X>

¹Технический университет Такоради, а/я 256, Такоради, Гана; georgeadayi@yahoo.com, vc@ttu.edu.gh, emarfous@yahoo.co.uk

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; n.babich@narfu.ru, v.melekhov@narfu.ru, d.klevtsov@narfu.ru

Поступила в редакцию 15.12.20 / Одобрена после рецензирования 16.02.21 / Принята к печати 19.02.21

Аннотация. Республика Гана входит в число 50 стран мира с самым высоким биологическим разнообразием видов растений и животных. Сеть лесных заповедников в стране является основой сохранения богатого биоразнообразия. В начале XX в. 1/3 территории Ганы была покрыта естественными тропическими лесами. Эти леса сейчас относятся к категориям заповедников и незащищенных участков. В Гане два основных типа растительности: саванны и леса – их особенности определяются количеством осадков, степенью влажности, геологией и почвами. В ходе инвентаризации лесных ресурсов Ганы выяснилось, что площадь лесов сократилась на 19 %. Сохранение биоразнообразия, смягчение последствий изменения климата, экотуризм и улучшение условий жизни стали важными направлениями в лесном хозяйстве Ганы. Это привело к значительным изменениям способов управления лесами и их эксплуатации. Массовые программы облесения, начатые в стране, способствуют сохранению многих популяций флоры и фауны. Лесной сектор включает лесное хозяйство и деревообрабатывающую промышленность, которые вносят значительный вклад в валютную выручку Ганы за счет экспорта изделий из древесины. В 2015 г. выручка от экспорта первичной лесной продукции составила 230,2 млн долл. США. В Гане 26 видов древесных пород используются для производства различных частей садовой мебели на экспорт. В лесном секторе занято более 100 тыс. рабочих. Гана получает огромные доходы от экспорта пиломатериалов



и изделий из дерева, благодаря чему существует программа облесения. Политика правительства заключается в том, чтобы обязать все лесопромышленные предприятия, вырубая деревья, высаживать саженцы для восстановления тропического леса. Гана готова к масштабным лесовосстановительным акциям в целях внесения вклада в решение проблем обезлесения, изменения климата, с которыми сталкивается человечество.

Ключевые слова: лесные ресурсы Ганы, лесной сектор Ганы, тропические леса, лесные продукты, изменение климата, окружающая среда

Для цитирования: Адаи Д.М., Эшун Д.Ф., Марфо Э.Д., Бабич Н.А., Мелехов В.И., Клевцов Д.Н. Лесные ресурсы Республики Гана // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 5. С. 186–194. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-186-194>

Research brief

Forest Resources of the Republic of Ghana

George M. Adayi¹, Research Scientist; ResearcherID: [AAR-8456-2021](https://orcid.org/0000-0003-1143-8094),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1143-8094>

John F. Eshun¹, Prof., Vice-Chancellor; ResearcherID: [AAS-8733-2021](https://orcid.org/0000-0003-3934-9878),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3934-9878>

Eric D. Marfo¹, Candidate of Chemistry, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAR-8989-2021](https://orcid.org/0000-0002-0895-9537),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0895-9537>

Nikolay A. Babich², Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [G-7384-2019](https://orcid.org/0000-0001-7463-2519),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7463-2519>

Vladimir I. Melekhov², Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [Q-1051-2019](https://orcid.org/0000-0002-2583-3012),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2583-3012>

Denis N. Klevtsov^{2✉}, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [A-7791-2019](https://orcid.org/0000-0001-6902-157X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6902-157X>

¹Takoradi Technical University, P.O. BOX 256, Takoradi, Western Region, Republic of Ghana; georgeadayi@yahoo.com, vc@ttu.edu.gh, emarfous@yahoo.co.uk

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; n.babich@narfu.ru, v.melekhov@narfu.ru, d.klevtsov@narfu.ru✉

Received on December 15, 2020 / Approved after reviewing on February 16, 2021 / Accepted on February 19, 2021

Abstract. The Republic of Ghana is among the 50 countries in the world with the highest biodiversity of plant and animal species. The network of forest reserves in the country is the basis for the rich biodiversity conservation. One third of the Ghana's territory was covered with natural rainforests at the beginning of the 20th century. These forests are now classified as reserves and vulnerable areas. Ghana has two main types of vegetation: savannahs and forests. Their features are determined by the amount of precipitation, moisture level, geology and soils. An inventory of Ghana's forest resources revealed that the area of forests had been reduced by 19 %. Biodiversity conservation, climate change mitigation, ecotourism and the improvement of living conditions have become important areas in Ghana's forestry. This has led to significant changes in forest management and logging technologies. The large-scale afforestation programs initiated in the country support the conservation of many populations of flora and fauna. The forest sector includes forest management and woodworking industry, which contribute significantly to currency earnings in Ghana via the export of wood products.



Revenue from the export of primary forest products amounted to USD 230.2 million in 2015. Ghana uses 26 types of wood species to produce various parts of garden furniture for export. The forest sector employs more than 100,000 workers. Ghana earns enormous revenues from the export of sawn timber and wood products, so there is an afforestation program. The government's policy is requiring all timber companies that cut down trees to plant seedlings for the restoration of rainforests. Ghana is ready for a large-scale afforestation campaign so as to contribute to solving the problem of deforestation and climate change that humanity is facing.

Keywords: Ghana's forest resources, Ghana's forest sector, rainforests, forest products, climate change, environment

For citation: Adayi G.M., Eshun J.F., Marfo E.D., Babich N.A., Melekhov V.I., Klevtsov D.N. Forest Resources of the Republic of Ghana. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 5, pp. 186–194. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-186-194>

Исторически Гана была известна европейцам как Золотой Берег из-за огромных месторождений золота. Название Гана принято в 1957 г. под руководством доктора Кваме Нкрума сразу после обретения страной независимости от британского колониального господства. Гана расположена между 5–11° с. ш. 4° з. д. и 2° в. д. [32]. Она простирается примерно на 670 км к северу от океана. Население составляет около 24 млн человек и ежегодно увеличивается на 2,2 % [19].

Среднегодовая температура воздуха – +26,4 °С, максимальная – +33,9 °С, минимальная – +23,3 °С. Годовое количество осадков – 2000–2400 мм. Есть два дождливых периода: весенний (май–июнь) и осенний (октябрь). Если в январе (по многолетним данным) выпадает 32 мм осадков, то с июня по август – 732 мм. Часто осадки носят ливневый характер. Относительная влажность достигает 90–95 % [9].

В Гане два основных типа растительности: саванны и леса, – которые в основном определяются количеством осадков, степенью влажности, геологией и почвами [20]. Страна разделена на высоколесную зону на юге, занимающую около 1/3 площади суши (8 млн га), зону саванн (14,7 млн га) – в основном на севере – и переходную зону лесных массивов (1,1 млн га) [1]. В начале XX в. 1/3 территории Ганы была покрыта естественными тропическими лесами. Сейчас леса в основном относятся к категориям заповедников и незащищенных участков.

В 1962 г. специалисты по лесному хозяйству А.Ф. Мукин и М.П. Альбяков (ЛенНИИЛХ) посетили Республику Гана, провели обследование лесных участков, предназначенных для рубок и создания каучуковых плантаций гевеи. Ученые обнаружили около 300 различных пород деревьев, из которых лишь 30–40 имеют хозяйственное значение [3].

В Африке (в том числе в Гане) кроме естественных лесов широко распространены лесные посадки из интродуцированных древесных пород. Из хвойных деревьев высаживают в основном сосны: американские (лучистую, карибскую, ладанную, поникающую), а также канарскую и длиннохвойную. Из твердолиственных пород особенно популярны австралийские эвкалипты и различные акации.

Лесозаготовки во многих странах Африки ведутся главным образом для удовлетворения нужд местного населения в топливе и хозяйственно-поделочной древесине. В ряде стран (Ангола, Камерун, Конго, Габон, Гана, Берег Слоновой Кости, Либерия, Нигерия) ценная цветная древесина заготавливается

на экспорт. Нередко заготовки осуществляются иностранными фирмами [2]. В Западной Африке Гана является ведущим игроком в отрасли заготовки тропических древесных пород и торговли ими, но ее роль здесь уменьшается из-за истощения лесных ресурсов.

Естественные тропические высокогорные леса Ганы – возобновляемый ресурс, важный в социально-экономическом плане еще со времен первых поселений. В настоящее время правительство разработало производственную систему «Лиственный лес», а также взяло под контроль лесные ресурсы через централизованные агентства по управлению ресурсами.

Цель исследования – обзор лесохозяйственной деятельности в Гане с конца колониальной эпохи до наших дней, выявление тенденции развития лесной промышленности в связи с ростом населения.

В таблице показаны изменения площади высокоствольных лесов в период 1948–2010 гг. [21, 23]. Общий запас древостоя и биомасса лесов Ганы, которые частично отражают динамику популяций генетических ресурсов, снизились. По оценкам специалистов, за этот период у 10 наиболее распространенных видов запас древостоя сократился примерно на 22 % [7, 18].

**Тенденция изменения площади высокоствольных лесов (га)
в период с 1948 по 2010 г.**

Trend in high forest area (ha) between 1948 and 2010

Год	Заповедный лес	Незащищенный лес	Всего леса	Другие земли
1948	1517,6	2780,7	4298,3	3441,7
1952	1521,2	1854,9	3376,1	4298,8
1955	1528,8	1439,6	2968,4	4805,5
1962	1524,4	931,9	2456,3	5801,4
1965	1513,2	823,7	2336,9	5920,7
1969	1563,1	617,0	2180,1	6077,5
1972	1678,8	374,0	2096,9	6172,5
1975	1678,8	265,4	1944,2	6281,7
1978	1678,8	167,4	1846,2	6379,7
1981	1678,8	108,0	1786,8	6439,1
1984	1678,8	60,6	1739,4	6486,5
1987	1678,8	39,6	1718,4	6507,5
1989	1678,8	33,3	1712,1	6513,8
1990	1678,8	30,8	1709,6	6516,0
2000	1386,5	352,0	1738,5	4354,9
2005	1255,2	352,0	1607,2	3909,2
2010	1123,9	352,0	1475,9	3463,5

Лесная промышленность обеспечивает рабочие места и источник дохода многим местным сообществам [15, 28, 29]. Лесной сектор состоит из лесного хозяйства и деревообрабатывающей промышленности, которые вносят значительный вклад в валютные поступления Ганы за счет экспорта изделий из древесины. К 1992 г. выявлены новые породы деревьев, что увеличило количество разновидностей изделий из древесины для экспорта [11].

Промышленность в Гане подразделяется на три категории: первичная (лесозаготовки), вторичная (распиловка, фрезерование и фанерование) и третичная (детали мебели, молдинги и др.) [26]. Деревья диаметром более 60 см вырубает и распиливают для транспортировки грузовиками на фабрики и дальнейшей обработки. Полученный конечный продукт экспортируется как лесоматериал с добавленной стоимостью.

В XX в. круглые бревна из Ганы экспортировались в Европу, для этого их сплавливали в порт (рис. 1, 2). После открытия новых пород количество экспортных пород увеличилось [8]. На рис. 3 показана погрузка пиломатериалов на корабль в порту Такоради. В Гане 26 древесных пород применяются для производства различных деталей садовой мебели на экспорт [16]. Вариант мебели, которую экспортируют и используют на внутреннем рынке страны, приведен на рис. 4.



Рис. 1. Разгрузка древесины на лесном складе в порту Такоради [14]

Fig. 1. Unloading timber to a warehouse at the Takoradi port [14]



Рис. 2. Сплав леса в порту Такоради, XX в. [14]

Fig. 2. Timber rafting in the Takoradi port in the 20th century [14]



Рис. 3. Погрузка пиломатериалов на судно в порту Такоради [14]

Fig. 3. Lumber is loaded onto a ship for export at the Takoradi port [14]



Рис. 4. Садовая мебель на экспорт и для внутреннего рынка [16]

Fig. 4. Garden furniture for export and for domestic market [16]

Древесина – 3-й по важности экспортный товар Ганы. Внутренний рынок лесоматериалов также довольно велик – более 1,7 млн м³ круглого леса [34]. Выручка от продажи продукции из древесины составляет около 11 % валютных поступлений страны [30]. Промышленность Ганы произвела в 2015 г. около 2,6 млн м³ круглого леса, и большая часть этого объема использована внутри страны [10, 26]. Экспорт продукции из первичной древесины в 2015 г. составил 230,2 млн долл. США. Древесина Ганы продается в различные страны мира. Некоторая часть поставляется по суше в другие африканские страны, в основном экспортируется через порты Tema и Takoradi. Эти порты имеют хорошее автомобильное сообщение с внутренними районами страны [24].

Лесная промышленность способствует увеличению нагрузки на окружающую среду [21]. Чрезмерная вырубка леса приводит к серьезным проблемам, включая изменение климата, образование отходов, эрозию почвы и крупномасштабное опустынивание, экономический спад [34]. Стремительное уменьшение площади тропических лесов вызывает беспокойство [33].

Сокращение площади лесов и их деградация оказывают значительное влияние на накопление парниковых газов в атмосфере [5, 6, 20]. Вырубка лесов способствует фрагментации крупных лесных массивов, что приводит к засухе и последующему усыханию древостоев, а также является фактором возникновения лесных пожаров [17, 25].

Незаконные рубки – серьезная проблема для Ганы, имеющая негативные экологические, экономические и социальные последствия [12, 30, 22]. Незаконные рубки в конечном итоге отрицательно влияют на экологические услуги и биоразнообразие, связанное с лесами [13], ведут к снижению внутренних и международных цен на лесные товары [16]. В некоторых случаях незаконные рубки были основным источником финансирования криминалитета, что уменьшало привлекательность экспорта древесины [11]. Только 15 % объема древесины заготавливается легально или с незначительными нарушениями [21].

Гана входит в число 50 стран мира с самым высоким разнообразием видов растений и животных. Сеть лесных заповедников является основой сохранения биоразнообразия [16]. Информация о лесных ресурсах Ганы была обновлена в 2002 г. После инвентаризации продуктивных лесов выяснилось, что в течение 10 лет полезная площадь лесов Ганы сократилась на 19 % [4, 9, 31].

Леса в разное время играли важную роль в жизни людей. Сейчас сохранение биоразнообразия, смягчение последствий изменения климата, экотуризм и улучшение условий жизни стали важными направлениями в лесном хозяйстве Ганы. Это привело к значительным изменениям в способах управления лесами и их эксплуатации.

Сельскохозяйственная политика правительства является основным фактором преобразования лесных угодий [27]. В Гане для искусственного возобновления используют питомники, где под интенсивным контролем выращивается посадочный материал, который затем используется для посадки [29]. На рис. 5 показан питомник в Гане.



Рис. 5. Питомник для выращивания саженцев в Гане

Fig. 5. A nursery for growing seedlings in Ghana

Большинство древесных пород, вырубаемых в естественных лесах Ганы, в настоящее время находятся под угрозой исчезновения. Примерами являются *Milicia excelsa* и *Afromosia* spp. Министерство лесного хозяйства приняло программу лесовосстановления, чтобы решить эту проблему. Саженьцы древесных пород выращиваются в питомниках и раздаются фермерам для посадки. Лесные генетические ресурсы также сохраняются в дендрариях в различных частях страны. Центр генетических ресурсов растений в Бунсо поддерживает дендрарий, в котором сохранены несколько древесных, лекарственных и других лесных видов.

Заключение

Республика Гана является важным лесным регионом африканского континента. Значительная часть населения страны занята в лесном секторе, который включает лесное хозяйство и деревообрабатывающую промышленность. Экспорт лесных товаров обеспечивает валютные поступления в бюджет страны. В Гане 26 видов древесных пород используются для производства различных частей экспортируемой садовой мебели. Массовые программы облесения, начатые на территории страны в последние годы, способствуют сохранению популяций флоры и фауны. Создание новых лесонасаждений должно приостановить потерю лесов и изменение климата. Необходимы дополнительные исследования для поиска путей применения малоизученных древесных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бородин А.М., Калуцкий К.К., Правдин Л.Ф. Тропические леса. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 296 с.

Borodin A.M., Kalutskiy K.K., Pravdin L.F. *Tropical Forests*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982. 296 p. (In Russ.).

2. Букитынов А.Д., Грошев Б.И., Крылов Г.В. Леса. М.: Мысль, 1981. 315 с.
Bukshytynov A.D., Groshev B.I., Krylov G.V. *Forests*. Moscow, Mysl' Publ., 1981. 315 p. (In Russ.).
3. Мукин А.Ф., Альбяков М.П. В джунглях Ганы // Лесн. хоз-во. 1962. № 8. С. 83–87.
Mukin A.F., Albyakov M.P. In the Jungles of Ghana. *Lesnoye khozyaystvo*, 1962, no. 8, pp. 83–87. (In Russ.).
4. Achard F., Eva H., Stibig H., Mayaux P., Gallego J., Richards T., Malingreau J. Determination of Deforestation Rates of the World's Humid Tropical Forests. *Science*, 2002, pp. 999–1002. <https://doi.org/10.1126/science.1070656>
5. Acquah-Moses E.K. Supply to the Local Market: From Policy to Chain Saw Lumber Production a Necessary Evil? *Troperbs International-Ghana Workshop, Proceeding 2*. Kumasi, Ghana, Wood Industries Training Centre, 2002. 54 p.
6. Affum-Baffoe K. *Global Forest Resources Assessment 2010*. Country Report, Ghana. FRA 2010/077. Rome, 2010. 49 p.
7. Alder D. Natural Forest Increment, Growth and Yield in Ghana. *Forest Inventory Seminar Proceedings*. Ed. by J.L Wong. Accra, Ghana, Forestry Department, 1989, pp. 47–52.
8. Alexander R. *Fine Quality Traditional Garden Furniture*. West Sussex, UK, Alexander Rose Ltd, 2005, pp. 1–5.
9. Amekudzi L.K., Yamba E.I., Preko K., Asare E.O., Aryee J., Baidu M., Codjoe S.N.A. Variabilities in Rainfall Onset, Cessation and Length of Rainy Season for the Various Agro-Ecological Zones of Ghana. *Climate*, 2015, vol. 3, iss. 2, pp. 416–434. <https://doi.org/10.3390/cli3020416>
10. *Biennial Review and Assessment of the World Timber Situation 2015–2016*. Yokohama, Japan, ITTO, 2017. 223 p. Available at: http://www.itto.int/annual_review (accessed 14.06.21).
11. Brack D. Illegal Logging and the Illegal Trade in Forest and Timber Products. *International Forestry Review*, 2003, vol. 5, no. 3, pp. 195–198. <https://doi.org/10.1505/IFOR.5.3.195.19148>
12. Contreras-Hermosilla A. *Law Compliance in the Forestry Sector: An Overview*. WBI Working Paper. Washington DC, World Bank Institute, 2002. 40 p.
13. Dadzie P.K., Amoah M., Tekpetey S.L. Preliminary Assessment of Wealth Creation in Wood Products' Business in Ghana: The Perspective of Lumber and Furniture Production and Implications for Entrepreneurship. *International Journal of Business and Economics Research*, 2014, vol. 3, iss. 6, pp. 243–249. <https://doi.org/10.11648/j.ijber.20140306.15>
14. Domson O., Vlosky R.P. *A Strategic Overview of the Forest Sector in Ghana*. Working Paper No. 81. Louisiana Forest Products Development Center, 2007. 17 p. Available at: http://www.lfpdc.lsu.edu/publications/working_papers/wp81.pdf (accessed 14.06.21).
15. Eshun J.F. *Environmental Life Cycle Assessment to Enhance the Sustainability of the Timber Sector in Ghana*. Thesis. Wageningen, NL, Wageningen University, 2012. 118 p.
16. Eshun J.F., Potting J., Leemans R. Inventory Analysis of the Timber Industry in Ghana. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2010, vol. 15, pp. 715–725. <https://doi.org/10.1007/s11367-010-0207-0>
17. Fearnside P.M., Laurance W.F. Comment on “Determination of Deforestation Rates of the World's Humid Tropical Forests”. *Science*, 2003, vol. 299, iss. 5609, p. 1015. <https://doi.org/10.1126/science.1078714>
18. *Ghana Forest and Wildlife Handbook*. Ed. by K.A. Oduro, A. Gyamfi, S.B. Acquah, V.K. Agyeman. Ghana, CSIR-Forestry Research Institute of Ghana, 2012. 88 p.
19. *Guide for Country Reporting for FRA 2015*. Working Paper 184. FAO, 2015. 51 p. Available at: <http://www.fao.org/3/a-au190e.pdf> (accessed 18.07.21).
20. Hall J.B., Swaine M.D. *Distribution and Ecology of Vascular Plants in a Tropical Rain Forest*. Dordrecht, Springer, 1981. 383 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-8650-3>

21. Hawthorne W.D. The Flora and Vegetation of Ghana's Forests. *Ghana Forest Inventory Project. Proceedings of a Seminar*. Ed. by J. Wong. Accra, 1989, pp. 8–13.
22. Hawthorne W.D., Abu-Juam M. *Forest Protection in Ghana with Particular Reference to Vegetation and Plant Species*. Kumasi, Ghana, IUCN, 1995. 182 p.
23. Jipp P.H., Nepstad D.C., Cassel D.K., Reis de Carvalho C. Deep Soil Moisture Storage and Transpiration in Forests and Pastures of Seasonally-Dry Amazonia. *Climatic Change*, 1998, vol. 39, pp. 395–412. <https://doi.org/10.1023/A:1005308930871>
24. Lebedys A. *Trends and Current Status of the Contribution of the Forestry Sector to National Economies*. FAO Working Paper FSFM/ACC/07. Rome, FAO, 2004. 138 p.
25. Marfo E. *Chainsaw Milling in Ghana: Context, Drivers and Impacts*. Wageningen, Netherlands, Tropenbos International, 2010. 64 p.
26. Mayers J., Kotey E.N.A. *Local Institutions and Adaptive Forest Management in Ghana*. Ghana, IIED, 1996. 82 p.
27. Nepstad D., Tohver I.M., Ray D., Moutinho P., Cardinot G. Mortality of Large Trees and Lianas Following Experimental Drought in an Amazon Forest. *Ecology*, 2007, vol. 88, iss. 9, pp. 2259–2269. <https://doi.org/10.1890/06-1046.1>
28. Nobre C.A., Sellers P.J., Shukla J. Amazonian Deforestation and Regional Climate Change. *Journal of Climate*, 1991, vol. 4, iss. 10, pp. 957–988. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1991\)004<0957:ADARCC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1991)004<0957:ADARCC>2.0.CO;2)
29. Opeke L.K. *Tropical Tree Crops*. John Wiley & Sons, 1982. 312 p.
30. *Ownership and Use Rights of Forest Natural Resources*. London, ClientEarth, 2013. 27 p. Available at: <https://www.clientearth.org/latest/documents/ownership-and-use-rights-of-forest-natural-resources-ghana/> (accessed 25.08.21).
31. *Sector-Specific Environmental Impact Assessment Guidelines for Forest and Wood Industry*. Environmental Protection Agency Ghana/EPA, 1999, pp. 15–27.
32. *The State of the World's Forests*. Rome, FAO, 2005. 153 p. Available at: <https://www.fao.org/3/y5574e/y5574e.pdf> (accessed 12.07.21).
33. Wagner M.R., Cobbinah J.R. Deforestation and Sustainability in Ghana: The Role of Tropical Forests. *Ghana Journal of Forestry*, 1993, vol. 91, iss. 6, pp. 35–39.
34. White A., Cannell M.G.R., Friend A.D. Climate Change Impacts on Ecosystems in the Terrestrial Carbon Sink: A New Assessment. *Global Environmental Change*, 1999, vol. 9, suppl. 1, pp. S21–S30. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(99\)00016-3](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(99)00016-3)

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Научная статья

УДК 630*232.32; 630*91

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-5-195-203

Создание тепличных комплексов для выращивания посадочного материала сосны

К.Л. Михайлов[✉], канд. экон. наук, доц., вед. науч. сотр.; ResearcherID: [ABH-5210-2020](https://orcid.org/0000-0001-9296-3266),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9296-3266>

С.В. Горбунова, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [AAD-6407-2019](https://orcid.org/0000-0003-3137-2934),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3137-2934>

Д.Х. Файзулин, науч. сотр.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5474-7597>

Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия, 163062; klm1958@sevniilh-arh.ru[✉], svetlana.bobushkina@sevniilh-arh.ru, forestry@sevniilh-arh.ru

Поступила в редакцию 10.12.20 / Одобрена после рецензирования 15.03.21 / Принята к печати 17.03.21

Аннотация. Одним из определяющих вопросов при лесовосстановлении становится обеспечение в необходимых объемах посадочным материалом должного качества и установленных требований. Цель исследования – обоснование технологических возможностей и коммерческой привлекательности создания тепличного комплекса, ориентированного на арендаторов лесных участков малого и среднего бизнеса. Принята гипотеза о том, что расположение лесовосстановительной инфраструктуры вблизи мест происхождения семян и высадки посадочного материала обеспечивает лесохозяйственный и экономический эффекты в виде повышенной приживаемости лесных культур и большего прироста молодых насаждений. Основанием для такого подхода стали результаты исследований селекционного семеноводства хвойных пород (сосна, ель), семенной продуктивности и семенного происхождения за 1967–2017 гг. на территориях Республики Коми, Республики Карелии, Мурманской, Архангельской и Вологодской областей. В статье определена роль и формы партнерских отношений государства и лесного бизнеса при создании инфраструктурных объектов лесовосстановления. Методологическую основу исследования составили системный анализ и экономико-математические методы. Изучены состояние рынка посадочного материала в рассматриваемом регионе, специфика государственно-частного партнерства при возведении и дальнейшем содержании объектов лесной инфраструктуры. Рассчитана эффективность инвестиционного проекта и обоснована стоимость посадочного материала. Результатами научно-исследовательской работы являются структура затрат на выращивание сеянцев сосны в одну ротацию, расчет трансфертной (внутрифирменной) цены на конечный продукт. Приведены примеры участия государства в финансировании лесной отрасли в рамках государственно-частного партнерства. Эффективность создания и функционирования тепличного комплекса рассчитана по чистому денежному потоку, рентабельности инвестиций и сроку их окупаемости (по вариантам софинансирования государством и бизнесом). Полученные результаты адресованы арендаторам лесных участков, государственным структурам, отвечающим за организацию и управление отраслью. Приведенные расчеты могут быть использованы в лесном планировании и при разработке стратегических документов развития лесного комплекса.

Ключевые слова: лесное хозяйство, лесовосстановление, лесоразведение, тепличные комплексы, сеянцы с закрытой корневой системой, инвестиции в лесной сектор, государственно-частное партнерство

Благодарности: Публикация подготовлена в рамках государственного задания на проведение исследования по теме «Разработка экономико-организационных подходов повышения конкурентоспособности лесного хозяйства в условиях долгосрочной аренды лесных участков таежной зоны Европейского Севера России», регистрационный номер НИОКТР АААА-А19-119012590196-8.

Для цитирования: Михайлов К.Л., Горбунова С.В., Файзулин Д.Х. Создание тепличных комплексов для выращивания посадочного материала сосны // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 5. С. 195–203. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-195-203>

Original article

Creation of Greenhouse Complexes for Growing Pine Planting Material

Konstantin L. Mikhaylov[✉], *Candidate of Economics, Assoc. Prof., Leading Research Scientist; ResearcherID: [ABH-5210-2020](https://orcid.org/0000-0001-9296-3266), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9296-3266>*
Svetlana V. Gorbunova, *Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist; ResearcherID: [AAD-6407-2019](https://orcid.org/0000-0003-3137-2934), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3137-2934>*
Dan'yal H. Fayzulin, *Research Scientist; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5474-7597>*
Northern Research Institute of Forestry, ul. Nikitova, 13, Arkhangelsk, 163062, Russian Federation; klm1958@sevniilh-arh.ru[✉], svetlana.bobushkina@sevniilh-arh.ru, forestry@sevniilh-arh.ru

Received on December 10, 2020 / Approved after reviewing on March 15, 2021 / Accepted on March 17, 2021

Abstract. The provision of the necessary amounts of planting material of proper quality and standards becomes one of the defining issues in reforestation. The research aims at substantiating the technological possibilities and commercial attractiveness of creating a greenhouse complex oriented towards the renters of forest sites of small and medium business. We accepted the hypothesis that the location of reforestation infrastructure near the places of seed and planting material origin provides forestry and economic effects such as increased rooting ability of forest crops and greater growth of young plantations. The results of studies of selective seed breeding of conifers (pine, spruce), seed productivity and seed origin for 1967–2017 in the territories of the Komi Republic, the Republic of Karelia, the Murmansk region, the Arkhangelsk region and the Vologda region became the basis for this approach. The article defines the role and forms of partnership between the state and the forest business in the creation of infrastructure facilities for reforestation. The methodological basis of the study consisted of system analysis, economic and mathematical methods. We studied the state of the market of planting material in the region, the specifics of public-private partnerships in the construction and further maintenance of forest infrastructure facilities; calculated the effectiveness of the investment project and substantiated the cost of planting material. The results of the research and development work are the structure of the cost of growing pine seedlings in a single rotation, the calculation of the transfer (intercompany) price of the final product. There are examples of state participation in the financing of the forest industry within the framework of public-private partnership. The effectiveness of the creation and operation of the greenhouse complex is calculated by the net cash flow, return on investment and payback period (under the options of co-financing by the state and the business). The results are intended for the renters of forest sites, government institutions responsible for the organization and management of the industry. The calculations can be used in forest planning and in the design of strategic documents on the forest complex development.



Keywords: forestry, reforestation, afforestation, greenhouse complexes, ball-rooted seedlings, investments in the forest sector, public-private partnership

Acknowledgments: The paper was prepared within the framework of the state assignment for the research on “Development of Economic and Organizational Approaches to Increase the Competitiveness of Forestry under Long-Term Lease of Forest Lands in the Taiga Zone of the European North of Russia”, the R&D project registration No. AAAA-A19-119012590196-8.

For citation: Mikhaylov K.L., Gorbunova S.V., Fayzulin D.H. Creation of Greenhouse Complexes for Growing Pine Planting Material. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 5, pp. 195–203. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-195-203>

Введение

Наращиванию объемов лесовосстановления в регионах и стране в целом способствует создание объектов лесовосстановления – тепличных комплексов, питомников, лесных плантаций [1, 5, 8, 12]. Государственная позиция по рассматриваемому вопросу выражена Министерством природных ресурсов и экологии Российской Федерации: планируется создать в каждом российском регионе свой компонент по выращиванию сеянцев с закрытой корневой системой и выделить на эти цели бюджетные средства с привлечением частного бизнеса на условиях государственно-частного партнерства [2]. Таким образом, речь идет о переводе лесовосстановления и лесоразведения на широкомасштабную индустриальную основу, что неизбежно потребует обоснования планируемых к созданию инвестиционных объектов, а также изменения роли государства в управлении отраслью. С этой целью проведен анализ участия государства при ведении лесного бизнеса. Мировой опыт показывает широкое применение в лесном комплексе государственно-частного партнерства, являющегося законодательно оформленным эффективным экономико-организационным механизмом и представляющим собой систему отношений государства и бизнеса в договорной (контрактной) форме [13–20]. На практике это конкретные проекты, реализуемые государственными органами и бизнесом совместно или только бизнесом на объектах государственной или муниципальной собственности [7, 10].

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являются возможности решения вопроса лесовосстановления и коммерческая привлекательность инвестирования в тепличные комплексы для выращивания посадочного материала на основе сотрудничества государства и лесного бизнеса. Ученые-лесоводы отмечают зависимость успешности роста дерева от места происхождения семян. Рассмотрены результаты изучения селекционного семеноводства хвойных пород (сосна, ель), семенной продуктивности и семенного происхождения за 1967–2017 гг. на территориях Республик Коми и Карелии, Мурманской, Архангельской и Вологодской областей [2, 4–6, 9, 11]. Полученные данные показывают, что географический фактор происхождения семян необходимо учитывать как важный специфический параметр лесохозяйственного процесса при расчетах локаций размещения объектов лесовосстановления. Выращивание посадочного материала вблизи мест происхождения семян дает лесохозяйственный и экономический эффекты в виде повышенной приживаемости лесных культур и увеличения прироста молодых насаждений. Результаты, полученные учеными-лесоводами, являются весомым аргументом для размещения в различных районах сравнительно небольших и относительно недорогих объектов обеспечения посадочным материалом.

В качестве метода исследования при выделении вопроса лесовосстановления как основополагающего для лесного хозяйства, оценке состояния рынка посадочного материала в рассматриваемом регионе, специфики государственно-частного партнерства при создании объектов лесной инфраструктуры использовался системный анализ; при расчете эффективности инвестиционного проекта, обосновании стоимости посадочного материала – экономико-математические методы. Для характеристики продвижения продукции тепличного комплекса применялся метод трансфертного ценообразования, основанный на стоимостном выражении затрат и норматива прибыли. Информационной и эмпирической базой исследования стали предложения рынка оборудования, материалов, топлива, энергии для ведения лесного хозяйства, статистические показатели развития отрасли в 2019 г., отчетные данные лесозаготовительных предприятий Архангельской области.

В качестве примера создания и функционирования тепличного комплекса для выращивания сеянцев сосны рассматривалось предприятие на территории Архангельской области. Питомник состоит из промышленной площадки, 2 поликарбонатных теплиц размером 60×12 м каждая, теплового узла, скважины для воды, отдельно стоящего бытового помещения, складского помещения, площадки доращивания.

Результаты исследования и их обсуждение

Объем выращивания на исследуемом предприятии – 607 500 шт. сосны в одну ротацию. Производство такой мощности в значительной степени ориентировано на привлечение не самых крупных арендаторов, позволяет решать локальные проблемы обеспечения посадочным материалом в короткие сроки.

Начало работ – апрель; окончание – сентябрь. Создаются теплицы площадью 0,14 га, полезная площадь принимается за 90 %. Для выращивания однолетней сосны приобретаются кассеты (Plantek 81F) рассадные для лесного хозяйства с размерами $385 \times 385 \times 73$ мм, имеющие 81 ячейку, объем каждой – 85 см^3 . Срок службы кассет – 10 лет. Цена – 190 р. за шт. В одной теплице помещается 3750 кассет, или 303 750 шт. сеянцев. Для 2 теплиц требуется 7500 кассет на сумму 1 425 000 р. С учетом выхода сеянцев (95 %) принимается величина 577 125 шт. готовой продукции ($607\,500 \cdot 0,95 = 577\,125$).

Для заполнения кассет применяется торфяной субстрат, общая потребность в котором на одну ротацию составляет 52 м^3 ($85 \text{ см}^3 \times 81 \text{ ячеек} \times 7500 \text{ кассет} = 51\,637\,500 \text{ см}^3$). Стоимость – 268 512 р. (208 р. за мешок, в мешке – 40 л). Для мульчирования используется вермикулит агротехнический. Азотные удобрения вносятся в фазе массового появления всходов, расход составляет 175 кг (цена 1 кг – 45 р.). Фосфорно-калийные – во 2-й половине лета, расход – 75 кг (цена 1 кг – 106,5 р.). Итого расходы на приобретение удобрений – 15 862,5 р. На полу в теплице и на земле на площадке доращивания используется геотекстиль, затраты на приобретение которого составляют 4000 р.

Для расчета затрат на оплату труда принимается трудоемкость в объеме 3312 чел. ч. В рамках данной цифры выполняются следующие работы: 2 человека работают постоянно на 0,5 ставки (2184 чел. ч); посадкой в апреле (формированием кассет) занимаются 30 человек в течение 3 дн. (720 чел. ч); прополкой и удалением сорняков, пикировкой сеянцев – 5 человек в течение 3 нед. (360 чел. ч); в сентябре выносят из теплицы кассеты, обеспечивают подготовку к зиме 3 человека в течение 2 дн. (48 чел. ч).

Сбор семян сосны производится вручную на лесосеке со сваленных деревьев. Затраты на сбор шишек и получение семян составляют 95,2 тыс. р. Для заготовления высококачественных семян с должной генетической наследственностью требуются дополнительные затраты, которые в данной публикации не рассматриваются.

Оплата работ принята на уровне выплаченной среднемесячной заработной платы на одного работника в рассматриваемом регионе за 2019 г. по отрасли «Лесоводство и лесозаготовки» (ОКВЭД 2). Страховые взносы рассчитаны на уровне 30,2 %.

Отапливание осуществляется при помощи котельной, которая состоит из модуля теплоузла и модуля котельной. Последняя представляет собой 2 роботизированных пеллетных котла Royal 120 с высшей степенью автоматизации и тепловой мощностью по 120 кВт каждый, балансовая стоимость – 840 тыс. р. Расход пеллет за сезон составляет 30 т, или 46 м³ (удельный вес пеллет должен быть 640–670 кг/м³, для нашего расчета принимаем 655 кг/м³). Теплоноситель подается в теплицу и обогревает воздух за счет воздушных конвекторов «Гререрс». Вода потребляется из собственной скважины с глубины 12 м, полив производится автоматизированной системой. Готовая продукция реализуется в картонных коробках. Затраты на них составляют 127 000 р. на весь объем. Прочие расходы включают затраты на командировки, услуги связи, организованный набор работников, аренду измерительных приборов.

Себестоимость выращивания посадочного материала в одну ротацию на примере Архангельской области приведена в табл. 1.

Таблица 1

**Себестоимость выращивания посадочного материала (сеянцев сосны)
в одну ротацию для Архангельской области
The cost of growing planting material (pine seedlings)
in one rotation for the Arkhangelsk region**

Статья	Стоимость, р.	
	1 шт.	577 125 шт.
Заготовка семян	0,16	95 200
Сырье и материалы	0,89	513 485,5
Топливо (пеллеты древесные)	0,34	197 800
Электроэнергия	1,16	672 096
Вода	0,01	1900
Оплата труда со страховыми взносами	2,13	1 292 028
Амортизация	0,92	516 976
Транспортные расходы	0,03	18 000
Прочие расходы	0,11	66 148
<i>Итого</i>	5,84	3 373 633

Затраты на создание объекта оцениваются в 7,4 млн р., операционные расходы составляют 3,4 млн р. Таким образом, общая стоимость представленного инвестиционного проекта – 10,8 млн р.

При использовании посадочного материала для собственных нужд рассчитывается трансфертная (внутрифирменная) цена за один сеянец на основе затрат и норматива прибыли. Если норматив прибыли принимать на уровне 35 % от затрат, то цена одного сеянца составит 7,88 р. ($5,84 \cdot 1,35 = 7,88$). При продаже сеянцев другим фирмам отпускная цена повысится на величину НДС. Заметим, что рассматриваемое предприятие в 2020 г. реализовывало сеянцы сосны с закрытой корневой системой по 8,50 р. за единицу.

Оценка экономической эффективности создания и функционирования тепличного комплекса проводится по чистой приведенной стоимости (чистого денежного потока) NPV, рентабельности инвестиций и сроку их окупаемости (по вариантам софинансирования в рамках ГЧП).

Чистая приведенная стоимость определяется по формуле

$$NPV = -I_0 + \sum_{i=1}^T \frac{C_i}{(1+r)^i},$$

где I_0 – инвестиционные расходы, осуществляемые в начальный момент времени $t = 0$; C_i – денежный поток в t -й период; r – расчетный процент (норма доходности, альтернативные издержки капитала), в нашем примере устанавливается на уровне 10 %.

NPV отражает величину денежных средств, которую инвестор ожидает получить от проекта после того, как денежные притоки окупят первоначальные инвестиционные затраты и периодические денежные оттоки, связанные с осуществлением проекта. Поскольку денежные платежи оцениваются с учетом их временной стоимости и рисков, NPV можно интерпретировать как стоимость, добавляемую проектом. Ее также можно трактовать как общую прибыль инвестора.

Рентабельность инвестиций представляет собой отношение полученной прибыли к инвестиционным вложениям и выражается в процентах. В нашем примере срок окупаемости инвестиций (лет) определяется отношением чистой прибыли к объему вложенных средств.

В табл. 2 приведены показатели эффективности производства сеянцев сосны с закрытой корневой системой в одну ротацию при поддержке (софинансировании) государством и льготном налогообложении. Заметим, что без участия государства рассматриваемый инвестиционный проект окупается за 8 лет – непривлекательный для значительной части лесного бизнеса срок.

Таблица 2

Показатели проекта создания тепличного комплекса по выращиванию сеянцев сосны в рамках государственно-частного партнерства
Project parameters for the creation of a greenhouse complex for growing pine seedlings as part of a public-private partnership

Показатель	При софинансировании государством, %	
	30	50
Объем инвестиций (без учета софинансирования государством), тыс. р.	7569	5406
Выручка от реализации, тыс. р.	4905	4905
Текущие затраты (себестоимость), тыс. р.	3373	3373
Прибыль, тыс. р.	1532	1532
Чистая прибыль, тыс. р.	1325	1325
Рентабельность инвестиций (по прибыли), %	20,2	28,3
Чистый денежный поток на 3-й год, тыс. р.	-82	1880
Чистый денежный поток на 5-й год, тыс. р.	1915	3877
Срок окупаемости (по чистой прибыли), лет	5,7	4,0

Заключение

Представленные расчеты показывают, что организация инвестирования в тепличные комплексы с участием государства является технологически возможной и коммерчески привлекательной для бизнеса в рамках выполнения обязательств лесовосстановления при аренде лесных участков. Приведенные показатели эффективности финансовых вложений могут служить аргументом в пользу положительного разрешения вопроса об организации масштабного инвестирования в тепличные комплексы для производства посадочного материала с закрытой корневой системой на территории Республики Коми, Республики Карелии, Мурманской, Архангельской и Вологодской областей. Развитие партнерских отношений с государством в области финансирования лесовосстановительной инфраструктуры выступает дополнительным стимулом активизации производства и привлечения внебюджетных инвестиций в лесную отрасль. Выбор территории, локализацию объектов, масштабы производства следует соотносить с требованием оптимизации размещения производительных сил. Необходимо учитывать, что при размещении тепличных комплексов для выращивания сеянцев как можно ближе к месту происхождения семян и высадке посадочного материала возможно получение дополнительных лесохозяйственного и экономического эффектов. Приведенные расчеты могут быть использованы в лесном планировании и при разработке стратегических документов развития лесного комплекса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бабич Н.А., Корчагов С.А., Конюшатов О.А., Стребков Н.Н., Лупанова И.Н. Актуальные проблемы лесовосстановления на Европейском Севере России в рамках перехода к интенсивной модели ведения лесного хозяйства // Изв. вузов. Лесн. журн. 2013. № 2. С. 74–83.

Babich N.A., Korchagov S.A., Konyushatov O.A., Strebkov N.N., Lupanova I.N. Topical Issues of Reforestation in the European North of Russia in the Context of Switching to the Intensive Model of Forest Management. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2013, no. 2, pp. 74–83. (In Russ.). URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/625/lh8.pdf>

2. Березина Е. В лесу родится елочка? Дмитрий Кобылкин о лесовосстановлении, нехватке саженцев и биржевой торговле // Рос. газ. 2019, № 295. 30 дек. С. 4.

Berezina E. Will there be a Christmas Tree in the Forest? Dmitriy Kobylkin on Reforestation, Lack of Seedlings and Exchange Trade. *Rossiyskaya gazeta*, December 29, 2019, no. 295, p. 4. (In Russ.).

3. Васильев О.И. Технологические и экономические аспекты производства посадочного материала с закрытой корневой системой // Тр. СПбНИИЛХ. 2018. № 2. С. 53–63.

Vasilyev O.V. Technological and Economic Readiness of Container Tree Seedling Production. *Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute*, 2018, no. 2, pp. 53–63. (In Russ.). <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2018.2.53>

4. Вопросы лесокультурного дела на Европейском Севере. Архангельск, АИЛиЛХ, 1974. 144 с.

Issues of Silviculture in the European North. Arkhangelsk, AILiLKh Publ., 1974. 144 p. (In Russ.).

5. Гвоздухина О.А. Географические культуры ели в Архангельской области: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Архангельск, 2004. 20 с.

Gvozdukhina O.V. *Provenance Trial Plantations of Spruce in the Arkhangelsk Region*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2004. 20 p. (In Russ.).

6. Материалы отчетной сессии по итогам научно-исследовательских работ в десятой пятилетке (1976–1980). Архангельск: АИЛиЛХ, 1981. 102 с.

Proceedings of the Reporting Session on the Results of Research Work in the Tenth Five-Year Plan (1976–1980). Arkhangelsk, AILiLKh Publ., 1981. 102 p. (In Russ.).

7. Михайлов К.Л., Бобушкина С.В. Экономические вопросы лесовосстановления при повышении конкурентоспособности лесного хозяйства регионов // Экономика природопользования. 2020. № 6. С. 165–173.

Mikhaylov K.L., Bobushkina S.V. Economic Issues of Reforestation While Increasing the Competitiveness of Regional Forestry. *Nature Management Economics*, 2020, no. 6, pp. 165–173. (In Russ.). <https://doi.org/10.36535/1994-8336-2020-06-5>

8. Мочалов Б.А., Бобушкина С.В. Состояние и рост лесных культур сосны и ели, созданных из посадочного материала с открытыми и закрытыми корнями в средней и северной подзонах тайги Архангельской области // Тр. СПбНИИЛХ. 2016. № 1. С. 64–71.

Mochalov B.A., Bobushkina S.V. Health and Growth of Pine and Spruce Forest Cultures, Which Create From Seedlings, Ball-Rooted Planting Stocks in Middle and Northern Subbands of a Taiga of the Arkhangelsk Region. *Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute*, 2016, no. 1, pp. 64–71. (In Russ.). <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2016.6.64>

9. Проблемы притундрового лесоводства. Архангельск: АИЛиЛХ, 1995. 166 с.

Issues of Pre-Tundra Forestry. Arkhangelsk, AILiLKh Publ., 1995. 166 p. (In Russ.).

10. Просто и честно об инвестициях в инфраструктуру и государственно-частном партнерстве в России. Аналитический обзор РОСИИФРА. М.: Нац. Центр ГЧП, 2019. 36 с. Режим доступа: <https://pppcenter.ru/upload/iblock/0e4/0e47bb71822ded76d93c0de43386dfb9.pdf> (дата обращения: 20.09.22).

Simply and Honestly about Investments in Infrastructure and Public-Private Partnerships in Russia. Analytical Review by ROSINFRA. Moscow, Natsional'nyy Tsentri GChP Publ., 2019. 36 p. (In Russ.).

11. Селекция и семеноводство хвойных пород на Европейском Севере. Архангельск: АИЛиЛХ, 1990. 111 с.

Selection and Seed Production of Coniferous Species in the European North. Arkhangelsk, AILiLKh Publ., 1990. 111 p. (In Russ.).

12. Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года: утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 20 сент. 2018 г. № 1989-р. Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/cA4eYSe0MObgNpm5hSavTdlx-ID77KCTL.pdf> (дата обращения: 20.09.22).

The Strategy for the Development of the Forest Sector of the Russian Federation until 2030: Approved by the Order of the Government of the Russian Federation of September 20, 2018 No. 1989-р. (In Russ.).

13. Angelstam P., Naumov V., Elbakidze M. Transitioning from Soviet Wood Mining to Sustainable Forest Management by Intensification: Are Tree Growth Rates Different in Northwest Russia and Sweden? *Forestry*, 2017, vol. 90, iss. 2, pp. 292–303. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpw055>

14. Comeau P., Gravelines L., Lewis D. Creating Public-Private Partnerships in Intensive Forest Management. *XII World Forestry Congress*. Quebec, Canada, 2003. Available at: <http://www.fao.org/3/xii/0532-c1.htm> (accessed 17.03.21).

15. Delmon J. Understanding Options for Public-Private Partnerships in Infrastructure: Sorting Out the Forest from the Trees: Bot, Dbfo, Dcmf, Concession, Lease... Working Paper No. 5173. *Policy Research Working Papers*. Washington, World Bank, 2010. <https://doi.org/10.1596/1813-9450-5173>

16. *Forest Product Conversion Factors*. Rome. FAO, ITTO and United Nations, 2020. 70 p. <http://doi.org/10.4060/ca7952en>

17. Helmisaari H.S., Hanssen K.H., Jacobson S., Kukkola M., Luiro J., Saarsalmi A., Tamminen P., Tveite B. Logging Residue Removal after Thinning in Nordic Boreal Forests: Long-Term Impact on Tree Growth. *Forest Ecology and Management*, 2011, vol. 261, iss. 11, pp. 1919–1927. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.02.015>

18. Khan S.R., Pracha A.S., Shaheen N., Ahmed R. *The Quest for Sustainable Forest Management: Exploring Public-Private Partnerships in the Forestry Sector in Pakistan*. Sustainable Development Policy Institute, 2007. 28 p. Available at: <https://www.jstor.org/stable/resrep00581> (accessed 17.03.21).

19. Pretzsch H., del Río M., Biber P., Arcangeli C., Bielak K., Brang P. et al. Maintenance of Long-Term Experiments for Unique Insights into Forest Growth Dynamics and Trends: Review and Perspectives. *European Journal of Forest Research*, 2019, vol. 138, iss. 1, pp. 165–185. <https://doi.org/10.1007/s10342-018-1151-y>

20. Sturla A. Public-Private Partnership as a Way to Restore Forest Management. Some Evidence from Liguria. *L'Italia Forestale e Montana*, 2012, vol. 67(3), pp. 299–309. <https://doi.org/10.4129/IFM.2012.3.08>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest